MEHANIZACIJA U ŠUMARSTVU

Gordana Globočki-Lakić, Dane Marčeta

Banja Luka, 2025

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
ШУМАРСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF FORESTRY

MEHANIZACIJA U ŠUMARSTVU

Gordana Globočki-Lakić, Dane Marčeta

Banja Luka, 2025

UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
ŠUMARSKI FAKULTET

MEHANIZACIJA U ŠUMARSTVU

Autori:

dr Gordana Globočki-Lakić, redovni profesor
Univerzitet u Banjoj Luci; Mašinski fakultet

dr Dane Marčeta, vanredni profesor
Univerzitet u Banjoj Luci; Šumarski fakultet

Recenzenti:
prof. dr Velid Halilović - Univerzitet u Sarajevu; Šumarski fakultet
prof. dr Vladimir Petković - Univerzitet u Banjoj Luci; Šumarski fakultet

Izdavač:
Univerzitet u Banjoj Luci
Šumarski fakultet

Tehnička priprema: Dane Marčeta

Lektor: prof. dr Duško Pevulja

Štampa: Print shop

Odgovorno lice štamparije: Zoran Miovčić

Tiraž: 150

ISBN: 978-99976-49-74-4

© copyright 2024 - Sva prava su zadržana. Nijedan dio ove publikacije ne može biti reprodukovan, niti smješten u sistem za pretraživanje ili prenošenje u bilo kom obliku, elektronski, mehanički, fotokopiranjem, snimanjem ili na neki drugi način, bez pismene dozvole autora.

Odlukom Naučno-nastavnog vijeća Šumarskog fakulteta broj: 17.3.20-3/25 od 20. 01. 2025. godine i Senata Univerziteta u Banjoj Luci broj: 02/04-3.100-49/25 od 30. 01. 2025. godine, odobreno je da se rukopis knjige pod nazivom „Mehanizacija u šumarstvu“ objavi i štampa kao univerzitetski udžbenik.

SADRŽAJ

PREDGOVOR

1. INŽENJERSKI MATERIJALI I NJIHOVA PRIMJENA 3

1.1. Inženjerski materijali - podjela 3

1.1.1. Metalni materijali 4

1.1.2. Polimerni materijali 23

1.1.3. Keramički materijali 28

1.1.4. Kompozitni materijali 29

1.2. Svojstva i ispitivanje materijala 30

1.2.1. Strukturne, fizičke i hemijske osobine. 31

1.2.2. Električne i magnetne osobine 32

1.2.3. Tehnološke osobine 34

1.2.4. Specifične osobine materijala 35

1.2.5. Mehaničke osobine 36

2. MAŠINSKI ELEMENTI 50

2.1. Mašinski elementi za vezu 51

2.1.1. Mašinski elementi za razdvojivu vezu 51

2.1.2. Mašinski elementi za nerazdvojivu vezu 63

2.2. Mašinski elementi za prenos snage 64

2.2.1. Mehanički prenosnici snage 66

2.3. Mašinski elementi obrtnog kretanja 78

2.3.1. Vratila 79

2.3.2. Osovine 84

2.3.3. Osovinice 84

2.4. Mašinski elementi za oslanjanje i spajanje 85

2.4.1. Spojnice 85

2.4.2. Ležišta i ležaji 93

2.5. Mašinski elementi za provođenje fluida 104

3. MOTORI SA UNUTRAŠNJIM SAGORIJEVANJEM – SUS MOTORI 108

3.1. Podjela i princip rada 108

3.2. Pokretni i nepokretni dijelovi motora SUS 114

3.3. Sistem razvoda radne materije 123

3.4. Sistem za napajanje motora gorivom 127
3.5. Sistem za paljenje smješe 131
3.6. Sistem za podmazivanje motora 134
3.7. Sistem za hlađenje 139
3.8. Proračun parametara motora SUS 144
3.8.1. Teorijski (idealni) i realni (stvarni) ciklusi motora SUS 145
3.8.2. Radni parametri motora SUS 147
3.8.3. Toplotni bilans motora 153
4. ISTORIJSKI RAZVOJ MEHANIZACIJE U ŠUMARSTVU 155
5. MAŠINE ZA SJEČU I IZRADU 161
5.1. Motorna testera 162
5.1.1. Razvoj motornih testera 162
5.1.2. Podjela motornih testera 166
5.1.3. Tehničke karakteristike motornih testera 167
5.1.4. Električne motorne testere 185
5.2. Šumski čistač 187
5.3. Mašine za orezivanje i kresanje grana 191
5.3.1. Mašine za orezivanje 191
5.3.2. Mašine za kresanje grana 193
5.4. Mašine za guljenje kore 196
5.5. Mašine za cijepanje drveta 200
5.6. Mašine za iveranje drveta 203
5.6.1. Iverači s diskom 205
5.6.2. Iverači s bubnjem 206
5.6.3. Konusno-zavrtni iverači 209
5.7. Harvester 209
5.7.1. Podjela harvestera 211
5.7.2. Konstrukcijske karakteristike harvestera 212
5.7.3. Mjerni i kontrolni sistemi harvestera i ostali softveri 224
5.8. Harvarder 226
5.9. Feler bančer 228
6. MAŠINE ZA PRVU FAZU TRANSPORTA DRVETA 236
6.1. Mehanizacija malih gabarita u prvoj fazi transporta 236

6.1.1. Mobilna vitla 237
6.1.2. Mini traktori 239
6.1.3. Terenski četverotočkaši 240
6.1.4. Mini forvarderi i harvesteri 241
6.2. Traktor 243
6.2.1. Skider 250
6.2.2. Adaptirani poljoprivredni traktor (APT) 259
6.3. Forvarder 263
6.4. Žičano-užetni sistemi 269
6.4.1. Šumska vitla 270
6.4.2. Šumske vučnice 272
6.4.3. Šumske žičare 273
6.5. Mašine za transport drvnog ostatka nakon sječe 283
7. MAŠINE ZA DRUGU FAZU TRANSPORTA DRVETA 293
7.1. Drumski transport - kamioni 294
7.1.1. Dizalice za utovar drveta na kamionu 302
7.2. Željeznički transport 304
7.3. Vazdušni transport 308
7.3.1. Helikopterski transport 309
7.3.2. Transport zepelinima 312
7.4. Transport vodom 314
8. MAŠINE ZA PODIZANJE, NJEGU I ZAŠTITU ŠUMA 319
8.1. Mašine za sakupljanje i obradu šumskog sjemena 319
8.1.1. Penjalice 319
8.1.2. Tree shaker 321
8.1.3. Uređaji za ekstrakciju sjemena iz šišarki 321
8.2. Mašine u šumskim rasadnicima 323
8.2.1. Uklanjanje stabala 323
8.2.2. Priprema zemljišta 324
8.2.3. Sjetva 326
8.2.4. Presađivanje 328
9. MAŠINE ZA GRADNJU I ODRŽAVANJE ŠUMSKIH PUTEVA 331
9.1. Bageri 331

9.2. Buldozeri 333
9.3. Grejderi 335
9.4. Valjci 336
9.5. Mulčeri 338
9.6. Mašine za usitnjavanje kamena 339
9.7. GPS u gradnji puteva 340

PREDGOVOR

Mehanizacija je riječ grčkog porijekla, izvedena od riječi mehanizam, čije je prvobitno značenje bilo „vještački radim“. Kasnije, pa i danas u tehnici mehanizam označava cjelokupnost konstrukcije i sklopova neke mašine koji omogućuju njeno funkcionisanje, pri čemu se podrazumijeva da zamjenjuje ili olakšava ljudski rad. Kada se kaže da je neki rad odnosno posao mehanizovan, to znači da snagu ljudskih mišića zamjenjuje neka mašina. Uloga čovjeka zavisila je od faze razvoja tehnike, ali i od tipa mehanizma odnosno vrste posla. Kod rada nekih mehanizama uloga čovjeka se svodi na puštanje mašine u pogon, zaustavljanje i kontrolu, kod nekih se mehanizam ručno „hrani“ predmetom rada, a neke mehanizme dok rade čovjek drži u rukama. Riječ mehanizacija pretežno označava sam proces primjene mašina u cilju zamjene teškog fizičkog rada ljudi mašinama.

Iz ovih značenja riječi mehanizam i mehanizacija proističe i problematika koja se proučava u okviru nastavne discipline pod nazivom „Mehanizacija u šumarstvu“.

Osnova za praćenje tj. proučavanje ukupne problematike mehanizacije su znanja iz fizike, tehničke mehanike i srodnih disciplina. Glavni dio programa obuhvata upoznavanje i primjenu mašina i to sa tehničko-tehnološkog i ekonomskog aspekta.

Danas se, prema stepenu zamjene ljudskog rada radom mašina, razlikuju različite generacije mašina ili nivoi mehanizovanosti. Prvi stepen se karakteriše primjenom mehanizama kojim čovjek rukuje i to često uz znatan fizički napor. Drugi stepen se karakteriše time što radnik komanduje mašini. Njegova uloga se svodi na fizičko prisustvo, ali praktično bez fizičkog napora. U ovom slučaju radnik pritiskom na dugme ili pomjeranjem poluge i sl. upravlja radom mašine. Treći stepen se karakteriše automatizacijom, u kom slučaju se uloga čovjeka svodi na kontrolu, tj. nadgledanje. Najzad, četvrti stepen se karakteriše primjenom robota i kompjutera u kom slučaju se uloga čovjeka svodi na biranje programa i sl. U zadnje vrijeme se govori i o petom stepenu gdje mašine ne samo da izvršavaju zadatke koje su im zadali ljudi, već posjeduju sposobnost samoučenja i donošenja odluka bez ljudskog nadzora ili programiranja za specifične situacije. Ovaj stepen obuhvata napredne algoritme umjetne inteligencije i mašinskog učenja, omogućavajući mašinama prilagođavanje promjenjivim uslovima i samostalnu optimizaciju operacija.

Prethodno pomenute etape globalno se razlikuju. Međutim, i danas, u fazi četvrte etape, prisutni su nivoi mehanizacije karakteristični za prethodne tri etape. To zavisi od uslova primjene mehanizacije, privredne grane i drugih faktora. Na primjer, u šumarstvu se, s jedne strane, koriste ručni mehanizmi, poput motornih testera i bušilica, koje radnik u potpunosti drži u rukama. Pri tom je izložen značajnom fizičkom naporu, kao i štetnim efektima izduvnih gasova, buke i vibracija. S druge strane, u šumarstvu su prisutni uređaji i mašine čiji je rad u velikoj mjeri ili potpuno automatizovan. Mehanizacija radnog procesa omogućava postizanje više ciljeva, kao što su smanjenje ili eliminisanje fizičkog napora, povećanje produktivnosti rada, smanjenje troškova proizvodnje, rješavanje problema nestašice radne snage, povećanje obima proizvodnje, unapređenje kvaliteta proizvoda i dr. Radovi u šumarstvu ubrajaju se među najteže fizičke radove uopšte, što mehanizaciji u šumarstvu daje poseban značaj. Uz to,

nedostatak radne snage u šumarstvu dodatno ističe važnost mehanizacije, koja se često nameće kao neophodan uslov za obavljanje proizvodnih procesa.

AUTORI

1. INŽENJERSKI MATERIJALI I NJIHOVA PRIMJENA

1.1. Inženjerski materijali - podjela

Materijali su supstance koje čine predmete u našoj okolini. Nauka o materijalima je disciplina koja se fokusira na istraživanje povezanosti između strukture i karakteristika materijala, kao i na metode obrade koje unapređuju njihova svojstva (poput termičke, termohemijske i termomehaničke obrade). Kao interdisciplinarno područje, ova nauka proučava karakteristike materije i njihovu primjenu u raznim granama nauke i inženjerstva, uključujući hemijsko i mašinsko inženjerstvo, elektrotehniku, građevinu i druge oblasti.

Pojam tehnički materijali podrazumijeva materijale koji se koriste u raznim oblicima i od njih se izrađuju zaličiti proizvodi i dijelovi koji su u svakodnevnoj upotrebi. Mašinski materijali se mogu se svrstati u tri osnovne grupe:

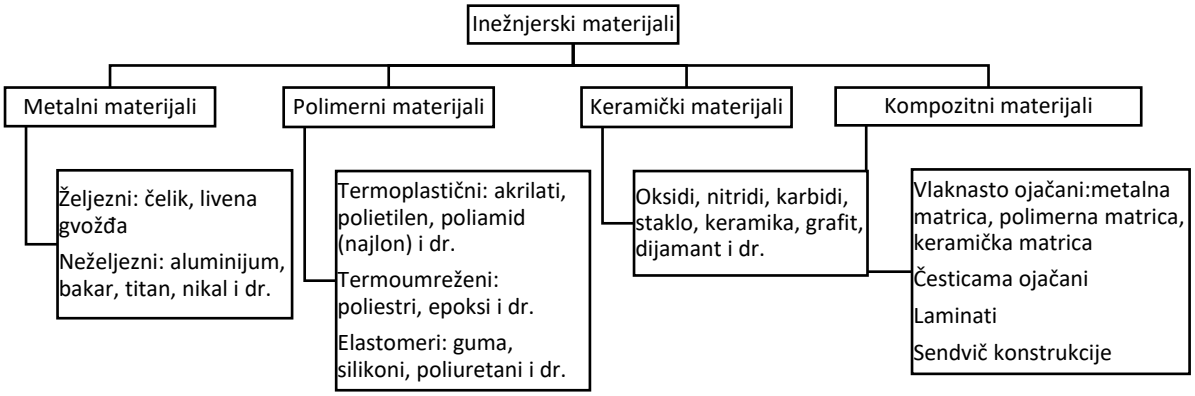
1. Konstrukcioni,
2. Pomoćni,
3. Pogonski materijali.

Konstukcioni materijali su oni koji se koriste za izradu mašinskih dijelova različitih proizvoda kao što su: postrojenja, mašine, uređaji, alati, pribori i sl. Najčešće se susreće podjela ovih materijala na sljedeće osnovne grupe (Slika 1.1):

1. Metalni materijali,
2. Polimerni materijali,
3. Keramički materijali i
4. Kompozitni materijali.

Za konstrukcione materijale posebno je važno da posjeduju dobra mehanička svojstva, koja se odnose na otpornost materijala na djelovanje opterećenja ili sila. Osim toga, konstrukcioni materijali moraju imati i odgovarajuća tehnološka svojstva, koja podrazumijevaju sposobnost materijala za obradu tokom izrade određenog dijela ili proizvoda.

U mašinstvu, pored konstrukcionih materijala, značajnu ulogu imaju i pomoćni i pogonski materijali. Najčešći pomoćni materijali uključuju drvo, kožu, keramiku, plastične mase, zaptivke, izolacione materijale i druge slične supstance. S druge strane, među pogonskim materijalima najviše se koriste različite vrste goriva, maziva, vazduh, voda i razni radni fluidi, a njihov osnovni cilj je proizvodnja, transformacija i prenos različitih oblika energije.



Slika 1.1. Podjela inženjerskih materijala

1.1.1. Metalni materijali

Savremene mašine i konstrukcije temelje se na upotrebi metala, koji se smatraju najvažnijim konstrukcionim materijalima. Prema definiciji Lomonosova, metali su svijetla tijela koja se mogu kovati. Ovi materijali se izrađuju od jednog ili više metalnih elemenata, uz prisustvo određenih nemetalnih elemenata, poput ugljika, azota ili kiseonika. Njihova svojstva u velikoj mjeri zavise od broja slobodnih elektrona. Metali imaju kristalnu strukturu u kojoj su atomi organizovani u prostoru tako da formiraju kristalne rešetke. Karakteristike metala uključuju:

- Odlikuju se izvanrednom električnom i toplotnom provodljivošću.
- Posjeduju sposobnost emisije elektrona pod uticajem zagrijavanja.
- Ne dopuštaju prolazak svjetlosti kroz njih.
- Kada su polirane, njihove površine imaju visok sjaj.
- Imaju relativno visoku čvrstoću i plastičnost na sobnim temperaturama, dok mnoga od ovih svojstava ostaju očuvana i na povišenim temperaturama.

Metali su kristalni materijali i imaju sve osobine koje karakterišu kristalne materijale:

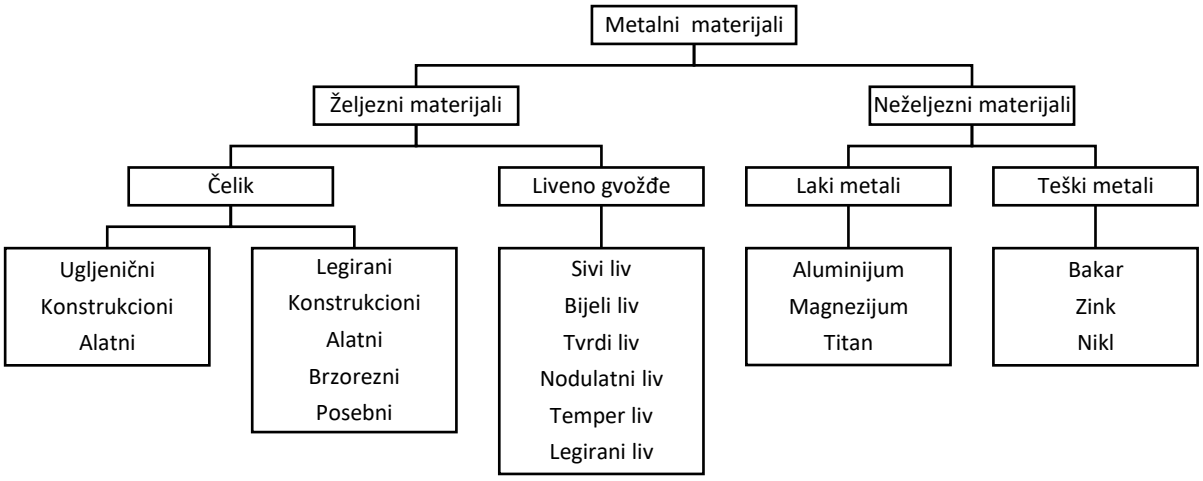
- Anizotoropija - različita svojstva materijala (obično kristala) u različitim smjerovima,
- Određena temperatura topljenja i očvršćavanja,
- Pravilan raspored atoma u kristalnoj rešetki, čiji oblik direktno utiče na osobine materijala.

Čisti metali imaju nisku čvrstoću i ne pružaju odgovarajuća mehanička, fizička i tehnološka svojstva, zbog čega se rijetko primjenjuju. U inženjerskoj praksi mnogo širu primjenu imaju legure. Metali se rijetko koriste u hemijski čistom obliku; svaki metal sadrži određeni procenat primjesa. Ukoliko je taj procenat mali i primjese ne utiču značajno na svojstva osnovnog metala, govorimo o tehnički čistim metalima. Suprotno tome, kada primjese bitno mijenjaju svojstva osnovnog metala, takav materijal naziva se legura.

Metali i legure, koji se koriste za inženjerske konstrukcije u mašinstvu, odlikuju se nizom poželjnih svojstava, poput čvrstoće, tvrdoće, plastičnosti, žilavosti, otpornosti na habanje i

koroziju, kao i stabilnošću karakteristika na visokim temperaturama. Njihova svojstva mogu se značajno poboljšati primjenom postupaka kao što su legiranje, termička, termomehanička i termohemijska obrada.

Inženjerski materijali, metali i legure, dijele se na one bazirane na željezu, koje nazivamo željeznim materijalima (legurama), i na one bazirane na drugim metalima, poznate kao neželjezni materijali (legure) (Slika 1.2).



Slika 1.2. Podjela metalnih materijala

Metali se dele na obojene i crne. Osnovni predstavnici crnih metala su željezo (gvožđe), kobalt, nikl i mangan. Za njih je karakteristična tamno siva boja, relativno velika zapreminska masa, relativno visoka temperatura topljenja, relativno velika tvrdoća i u većini slučajeva su polimorfni (Globočki-Lakić, 2023).

Crni metali se dijele na:

- Ferometali – željezo, kobalt, nikl i mangan.
- Teško topljivi metali – metali čija je temperatura topljenja viša od temperature topljenja željeza, a to su volfram, molibden, tantal.
- Uranovi metali – aktinidi, koji se primjenjuju u atomskoj energetici.
- Rijetki (zemni) metali – grupa metala poput lantanijuma, cerijuma, neodijuma itd.

Obojeni metali se dijele na:

- Laki metali – aluminijum, magnezijum i berilijum,
- Plemeniti metali – zlato, platina, srebro i metali srodni platini,
- Lakotopljivi metali – olovo, cink, kalaj, antimon itd.

Obojeni metali prepoznatljivi su po crvenoj, žutoj i bijeloj boji. Imaju nisku tvrdoću, relativno male temperature topljenja i ne pokazuju polimorfna svojstva, što znači da kristali mogu biti različitih oblika dok materijal zadržava isti hemijski sastav. Najvažniji predstavnici ove grupe metala su bakar, kalaj, olovo, cink, aluminijum i drugi.

1.1.1.1. Željezni materijali

Željezo i njegove legure čine 70% konstrukcionih materijala iz grupe metala koji se koriste u mašinstvu i konstrukcijama (Gabrić i Šitić, 2012). Hemijski čisto željezo ima ograničenu primjenu, ali dodavanjem legirajućih elemenata njegove mehaničke i druge osobine mogu se značajno poboljšati.

Ključni legirajući element je ugljenik, koji se u legurama željeza pojavljuje u obliku čistog ugljenika (grafita) ili intermetalnog hemijskog jedinjenja Fe_3C – cementita.

Rastvaranje ugljenika u željezu je u rasponu od 0,05% do 6.67%. Preko 6,67% ugljenik se izlučuje u obliku čistog grafita, što nema praktičnu primjenu.

Oko 70% ukupne proizvodnje i prerade metala otpada na preradu željeznih materijala, koji se dijele na čelike i livena gvožđa. Željezne rude se prvo prerađuju u sirovo gvožđe, koje se zatim dalje obrađuje kako bi se dobili čelici i livena gvožđa. Sirovo gvožđe se dobija redukcijom željeznih ruda od kojih su najznačajnije (Slika 1.3):

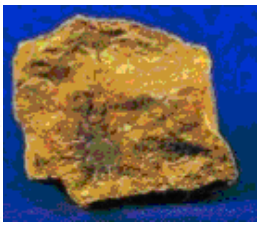
- Oksidne: Magnetit (Fe_3O_4)
  Hematit (Fe_2O_3)
  Limonit ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$)
- Karbonatne: Siderit ($FeCO_3$)
- Sulfidne: Pirit (FeS)



Magnetit (Fe_3O_4)



Hematit (Fe_2O_3)



Limonit ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$)



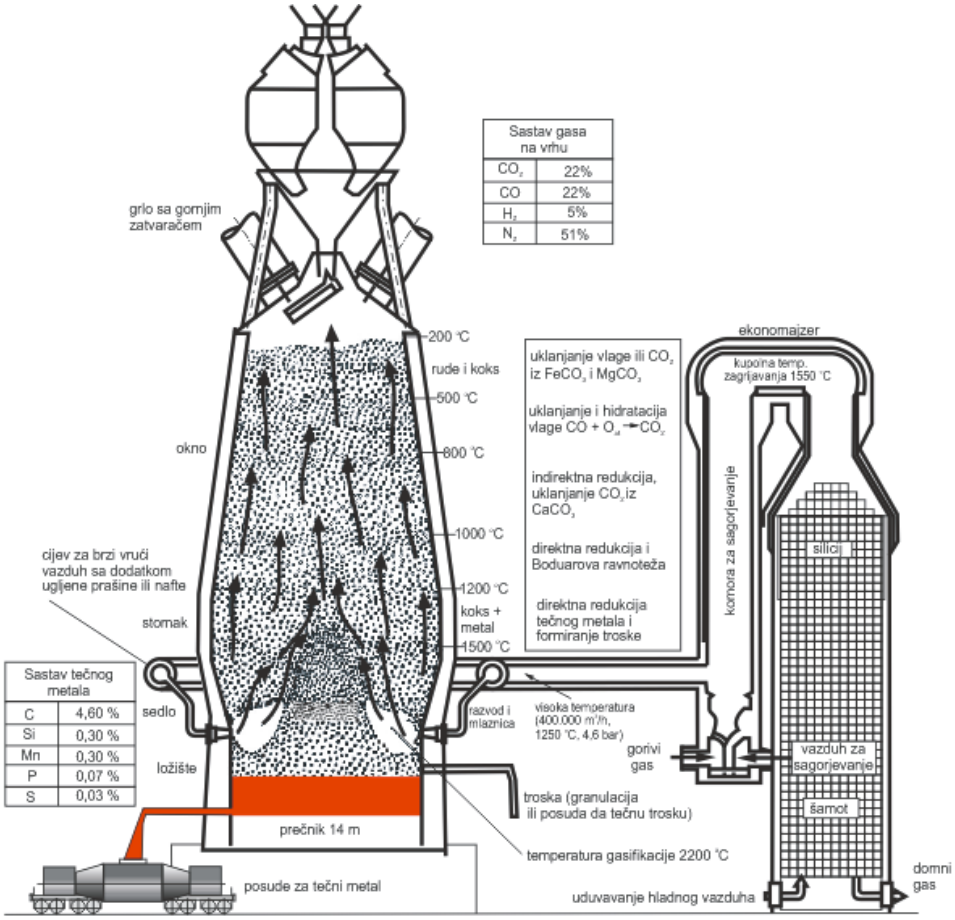
Siderit ($FeCO_3$)



Pirit (FeS)

Slika 1.3. Željezne rude

Sirovo gvožđe dobija se procesom redukcije željezne rude, koji se izvodi u visokoj peći. Peć se naizmjenično puni željeznom rudom, koksom (gorivom s visokim sadržajem ugljenika) i topiteljima, dok se istovremeno ubacuje velika količina zagrijanog vazduha kako bi se omogućilo sagorijevanje (Slika 1.4).



Slika 1.4. Dobijanje sirovog gvožđa u visokoj peći

U visokoj peći proces se odvija u 6 faza:

1. Punjenje visoke peći šaržom.
2. Prosušivanje rude i koksa na temperaturama od 200 do 500 °C.
3. Indirektna redukcija pri temperaturama od 500 °C do 1000 °C.
4. Direktna redukcija pri temperaturama od 1000 °C do 1200 °C kroz žareni koks, pri čemu dolazi do sagorijevanja i topljenja koksa uz uduvavanje zagrijanog vazduha koji učestvuje u direktnoj redukciji.
5. Na različitim visinama formiraju se rastopljeni slojevi troske i sirovog gvožđa, što omogućava njihovu lakšu separaciju.
6. Gvožđe i troska se sakupljaju i prebacuju u posebna kolica.

Sirovo gvožđe proizvedeno u procesu dobijanja čelika, u tečnom stanju se prenosi u peći za dalju rafinaciju, nakon čega se prerađuje u čeličanama (oko 85%). Preostalih 15% sirovog gvožđa koristi se za proizvodnju sivog, nodularnog, temper i drugih vrsta livova.

U zavisnosti od hemijskog sastava i brzine hlađenja tokom očvršćavanja, od livničkog gvožđa iz visokih peći mogu se dobiti:

- Gvožđe za preradu u čelik (bijelo sirovo gvožđe, prema boji preloma).
- Sivo livničko gvožđe (sivo sirovo gvožđe).

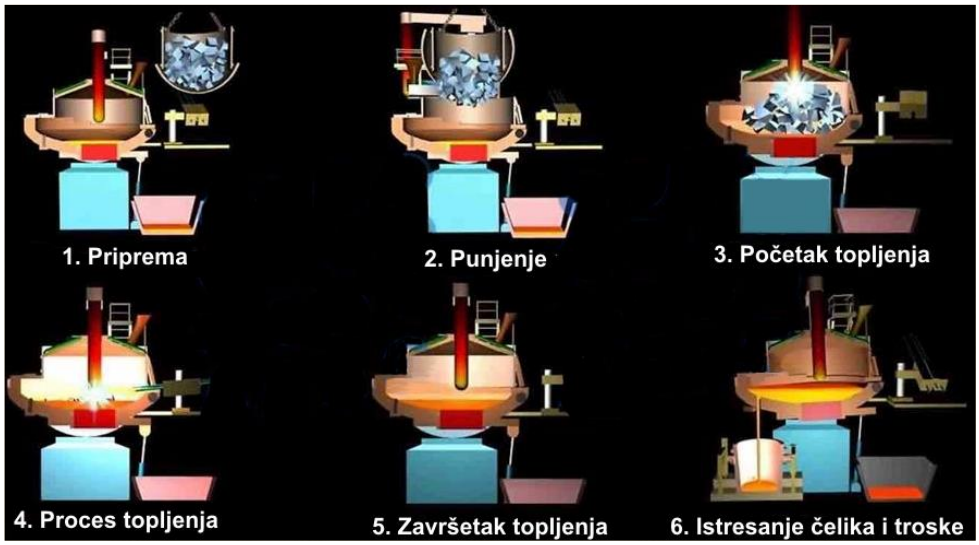
Obe vrste gvožđa dobijaju se na isti način, u rastopljenom stanju, ali se razlikuju po hemijskom sastavu i brzinama hlađenja tokom očvršćavanja. Gvožđe za preradu u čelik proizvodi se brzim hlađenjem u metalnim kalupima, pri čemu je ugljenik vezan u obliku cementita (Fe_3C). Sivo livničko gvožđe nastaje sporim hlađenjem, najčešće u pješčanim kalupima, što omogućava izdvajanje ugljenika u obliku grafita.

1.1.1.1.1. Čelici

Čelik se dobija iz sirovog gvožđa i starog čelika u pećima gdje se vrši dalja rafinacija i redukcija ugljenika na manje od 2% pri čemu se koriste sljedeći postupci:

- L-D (Linc i Donavic) postupak,
- Besemerov postupak,
- Tomasov postupak,
- Simens-Martinov postupak.

Pri legiranju se u tečni čelik dodaju legirajući elementi i uduvava inertan gas. Nakon toga, tečni čelik se preliva u livački lonac, dok se troska uklanja istresanjem (Slika 1.5.).



Slika 1.5. Proces topljenja u električnoj peći

Iz livačkog lonca čelik se dalje prerađuje u:

- Čelični liv – čelik se izliva u livačke kalupe (livačke kokile).
- Valjani čelici – prethodno liveni čelik u kokilama formira ingote, koji se zatim valjaju u šipke i limove različitih oblika i debljina.
- Vučeni čelici – čelici se u rastopljenom stanju izvlače u trake i profile različitih oblika i dimenzija.
- Kovani čelici – čelici se oblikuju kovanjem ili presovanjem iz ingota.

Čelici su legure željeza s udjelom ugljenika manjim od 2,0%, koji je osnovni legirajući element, ali također sadrže i druge elemente. Osim legirajućih elemenata, u sastavu čelika nalaze se i

primjese poput sumpora, fosfora, silicijuma i drugih. Oni predstavljaju najčešće korišćenu grupu mašinskih materijala. Poznato je nekoliko hiljada različitih vrsta čelika, koji se primjenjuju u gotovo svim oblastima mašinske tehnike.

Čelici se klasifikuju prema hemijskom sastavu, namjeni, strukturi, načinu proizvodnje, kvalitetu, kao i prema obliku i stanju poluproizvoda. Prema hemijskom sastavu, čelici se dijele na ugljenične čelike i legirane čelike.

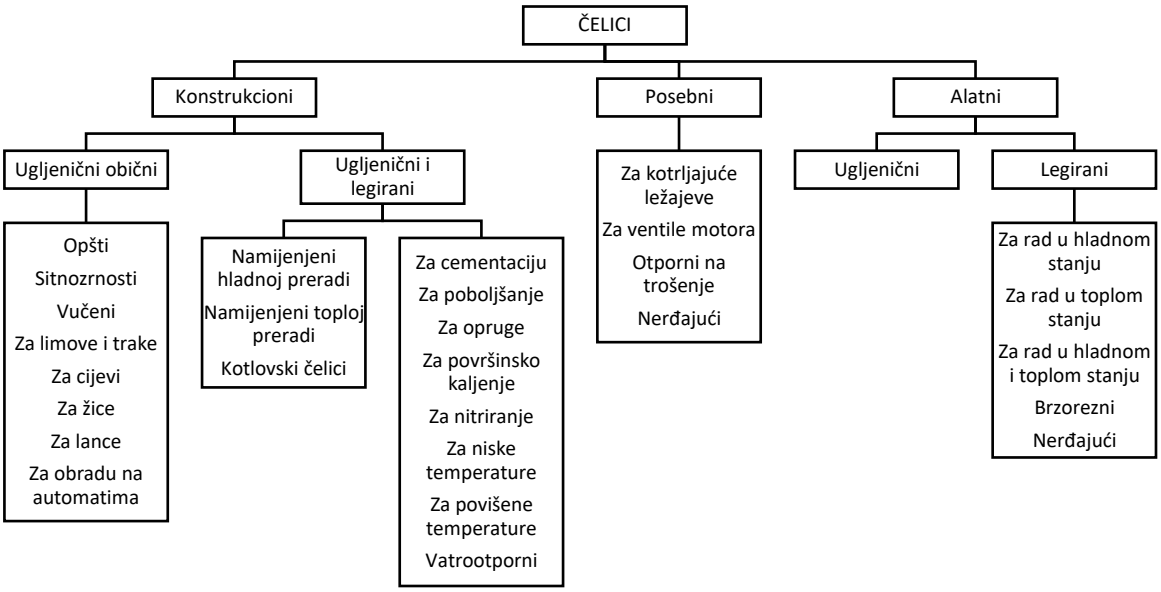
Ugljenični čelici su legure željeza i ugljenika čiji sadržaj ne prelazi 2%. Predstavljaju osnovni materijal u mašinstvu.

Prema sadržaju ugljenika, ugljenični čelici se dijele na:

- Niskougljenični čelici – sadrže do 0,25% ugljenika.
- Srednjeugljenični čelici – sadrže od 0,25% do 0,6% ugljenika.
- Visokougljenični čelici – sadrže preko 0,6% ugljenika.

Legirani čelici, pored ugljenika i primjesa, sadrže i dodatne legirajuće elemente. Razvrstavaju se na osnovu broja, vrste i sadržaja legirajućih elemenata. Prema broju legirajućih elemenata dijele se na jednostruko i višestruko legirane. Prema ukupnom udjelu legirajućih elemenata klasifikuju se na nisko legirane (do 5% legirajućih elemenata) i visoko legirane (više od 5% legirajućih elemenata). Visoko legirani čelici posjeduju specifična svojstva koja nisu karakteristična za ugljenične i nisko legirane čelike, poput otpornosti na visoke temperature, habanje i drugih specijalnih karakteristika. Ovi čelici obično se nazivaju prema legirajućim elementima koje sadrže, kao što su krom-nikl čelici (Cr-Ni), krom čelici, nikl čelici, krom-molibden-vanadijum čelici (Cr-Mo-V) i drugi.

Čelici se prema namjeni dijele na konstrukcione čelike, alatne čelike i čelike sa posebnim svojstvima (Slika 1.6). Ugljenični čelici s udjelom ugljenika do 0,6% svrstavaju se u konstrukcione čelike, dok oni s udjelom većim od 0,6% pripadaju alatnim čelicima.



Slika 1.6. Podjela čelika prema namjeni

U strukturi čelika i gvožda ugljenik može da bude u sljedećim oblicima:

- U vidu hemijskog jedinjenja Fe3C – karbida željeza, koji se naziva cementit.
- U slobodnom obliku kao grafit.
- Intersticijski (u međuprostoru) rastvoren u α-Fe i γ -Fe obrazujući čvrste rastvore.

Ugljenik se može nalaziti u obliku jedinjenja (cementit) ili slobodan (grafit), što dovodi do postojanja dva dijagrama stanja:

- Metastabilni dijagram stanja željezo–cementit (Fe-Fe_3C) (Slika 7).
- Stabilni dijagram stanja željezo–grafit (Fe-CGr).

Metastabilni dijagram koristi se za analizu čelika i livenih gvožđa kod kojih je ugljenik prisutan u obliku cementita. S druge strane, stabilni dijagram stanja primjenjuje se na livena gvožđa gdje je ugljenik izdvojen u obliku grafita.

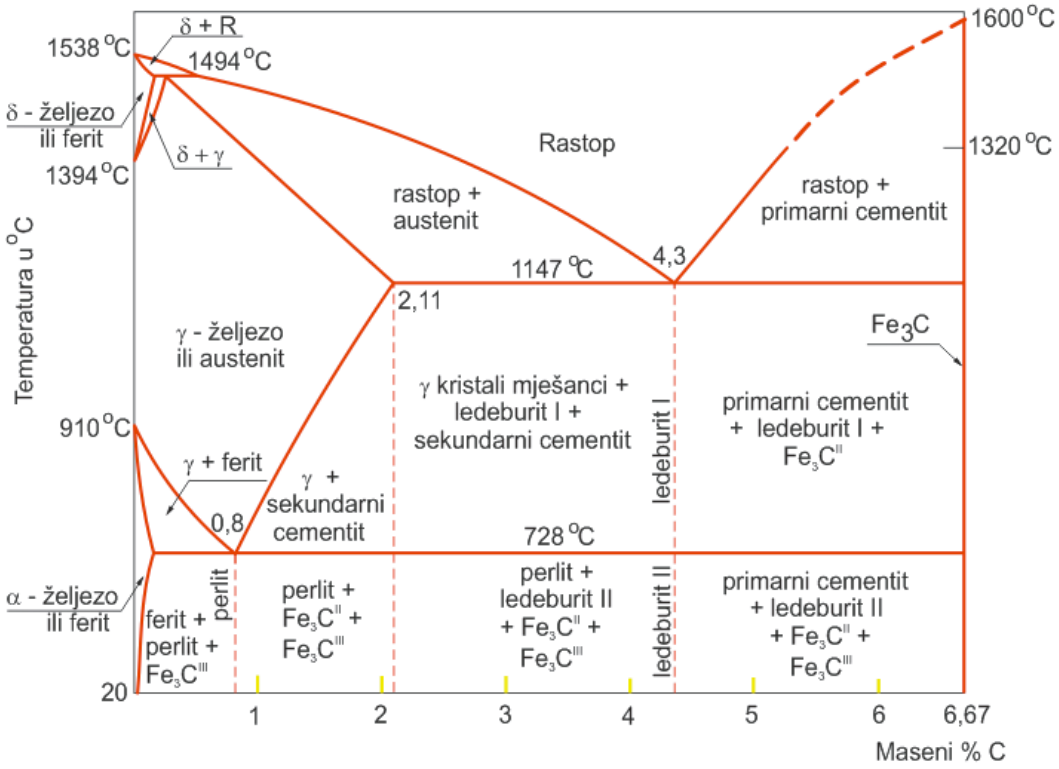
Osnovne strukture prikazane na Slici 1.7. su:

- Ferit – δ i α čvrsti rastvor s prostorno centriranom kubnom rešetkom.
- Austenit – γ čvrsti rastvor s površinski centriranom kubnom rešetkom.
- Cementit – intermetalno hemijsko jedinjenje.
- Perlit – eutektoidna mehanička smjesa ferita i cementita sa 0,8% C, nastaje iz austenita na 728 °C.
- Ledeburit I – eutektička mehanička smjesa austenita i cementita sa 4,3% C, nastaje iz rastopa.
- Ledeburit II – eutektoidna mehanička smjesa perlita i cementita, formira se iz ledeburita I na 728 °C tokom eutektoidne transformacije austenita.

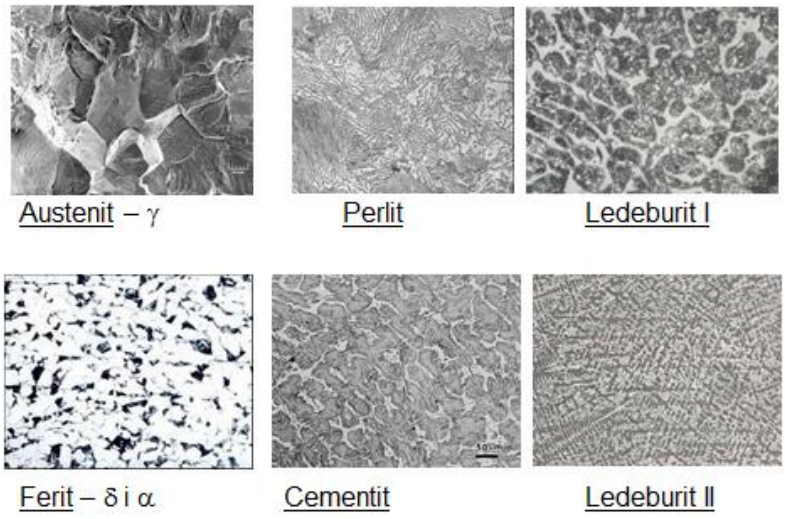
Prema kvalitetu, čelici se razvrstavaju na:

- Čelike običnog kvaliteta – ugljenični čelici.
- Kvalitetne čelike – mogu biti ugljenični ili legirani.
- Visokokvalitetne čelike – legirani čelici.
- Plemenite čelike – legirani čelici s posebnim svojstvima.

Čelici se prema obliku i stanju poluproizvoda dijele na: valjane, vučene, kovane, livene, brušene, presovane.



Slika 1.7. Metastabilni dijagram stanja željezo – cementit (Fe-Fe3C)



Slika 1.8. Osnovne strukture

Označavanje čelika

Stari sistem označavanja čelika prema standardu JUS C.B0.0022 bio je strukturiran na sljedeći način: Č XXXX(X).X(X...)-X(X...)

- Č – slovni simbol: Č – oznaka za čelik. ČL – oznaka za čelični liv.
- XXXX(X) – osnovna oznaka: Sastoji se od četiri ili pet brojčanih simbola kojima se definiše vrsta čelika.
- X(X...) – dopunska oznaka: Sadrži jedan, dva ili više brojčanih ili slovnih simbola, ili njihove kombinacije, koji označavaju namjenu ili stanje proizvoda.
- X(X...) – ostale dopunske oznake: Sadrže jedan, dva ili više brojčanih ili slovnih simbola, ili njihove kombinacije, kojima se dodatno označavaju specifične karakteristike čelika, ukoliko je potrebno.

Označavanje čelika – stari način označavanja prema JUS-u, primjeri:

Č.1840
1 – označava da je čelik ugljenični.
8 – označava približan sadržaj ugljenika (oko 0,8%), što ga svrstava u visokougljenične čelike.
40 – označava da je riječ o alatnom čeliku.

Č.4570
4 – označava da je hrom (Cr) najuticajniji legirajući element.
5 – označava da je nikl (Ni) drugi najuticajniji legirajući element.
70 – označava da je čelik hemijski postojan i vatrootporan.

Brojčani simbol legirajućeg elementa	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Legirajući element	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	ostali

Tabela 1.1: Označavanje čelika prema standardu JUS C.B0.0022.

od 0 do 19	ugljenični čelici s propisanim hemijskim sastavom i legirani čelici nenamijenjeni termičkoj obradi
101 - 109	legirani čelici nenamijenjeni termičkoj obradi
od 20 do 29	ugljenični i legirani čelici za cementaciju
201 - 299	
od 30 do 39	ugljenični i legirani čelici za poboljšanje
301 - 399	
od 40 do 59	ugljenični i legirani čelici za alate
401 - 599	
od 60 do 69	čelici s naročitim fizičkim osobinama
601 - 699	slobodno za čelike koji ne pripadaju ostalim grupama
od 70 do 79	čelici hemijski postojani i vatrootporni
701 - 799	
od 80 do 89	brzorezni čelici
800 - 899	slobodno za nove podgrupe ili za popunjene podgrupe
od 90 do 99	čelici za automate
9001 - 999	slobodno za čelike koji ne pripadaju ostalim grupama

Označavanje čelika je visoko standardizovano. Danas je registrovano negdje oko 3000 različitih vrsta čelika. Počev od 2004 godine, usvojen je evropski sistem označavanja. Čelici se obilježavaju prema sljedećim standardima:

1. EN 10027-1:2003 Sistem za označavanje čelika - Dio 1: Označavanje, osnovne oznake;
2. EN 10027-2:2003 Sistem za označavanje čelika - Dio 2: brojčani sistem;
3. EN 10260:2003 Sistem za označavanje čelika - Dodatne oznake.

Označavanje čelika prema američkim standardima

Konstrukcioni čelici su standardizovani po AISI (Ameriean Institute for Steel & Iron) i SAE (Society of Automotive Engineers). Ovi standardi označavaju čelike brojčanim simbolima.

a) Prvi broj označava tip čelika (Tabela 1.2.).
b) Drugi broj označava udio glavnih legirajućih elemenata u procentima (%).
c) Treći i četvrti broj označavaju procentualni sadržaj ugljenika u čeliku, pomnožen sa 100.

Tabela 1.2: Tip čelika

Tip čelika	Oznaka
Ugljenični čelik	1
Ni čelici	2
Cr-Ni čelici	3
Mo čelici	4
Cr čelici	5
Cr-V čelici	6
W čelici	7
Cr-Ni-No čelici	8
Si-Mn čelici	9

Primjeri:

- Ugljenični čelik sa prosječnim sadržajem od 0,1% C, ima oznaku 1010.
- Čelik legiran sa hromom i vanadijumom (oko 1% Cr i 0,20% C), ima oznaku 6120.

Termička obrada čelika

Svojstva i ponašanje metala i legura tokom proizvodnih procesa i eksploatacije zavise od njihovog hemijskog sastava, strukture, postupaka prerade i primijenjenih metoda termičke obrade. Ključna mehanička svojstva, poput zatezne čvrstoće, napona tečenja, tvrdoće, žilavosti i plastičnosti, mogu se unaprijediti:

1. Izmjenom hemijskog sastava kroz proces legiranja,
2. Regulisanjem veličine metalnog zrna,
3. Prilagođavanjem strukture i formiranjem novih faza putem termičke obrade.

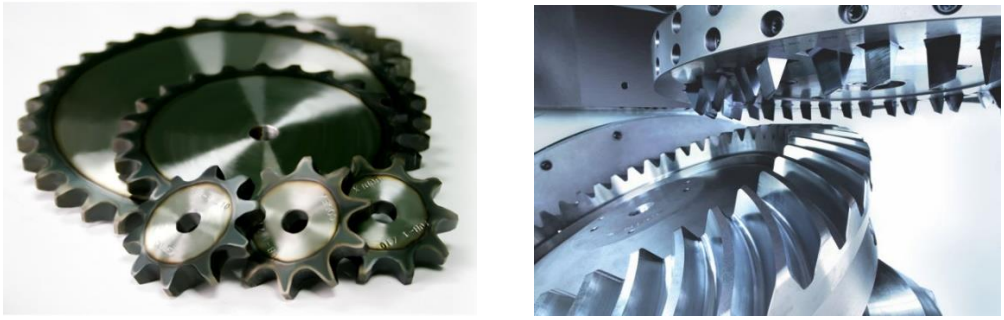
Termička obrada obuhvata procese koji uključuju zagrijavanje materijala do kritičnih temperatura, zadržavanje na tim temperaturama tokom određenog vremenskog perioda, te hlađenje određenim postupkom i brzinom. Jedan od najčešće korišćenih postupaka za unapređenje svojstava materijala je termička obrada čelika. Promjene strukture i formiranje novih faza tokom termičke obrade čelika odvijaju se u čvrstom stanju i zasnivaju se na:

- Sposobnosti željeza da postoji u različitim kristalnim rešetkama (polimorfizam).
- Promjenama rastvorljivosti ugljenika i legirajućih elemenata unutar kristalne rešetke željeza.
- Mogućnosti atoma da se difuzno premještaju pri povišenim temperaturama.

Kaljenje

Kaljenje je proces u kojem se čelik zagrijava na temperature nešto iznad kritične granice (750–950 °C), nakon čega slijedi hlađenje brzinom većom od kritične kako bi se formirala martenzitna struktura, što čeliku osigurava visoku tvrdoću i otpornost na habanje. Efikasnost kaljenja i postizanje martenzitne strukture kroz cijeli poprečni presjek zavise od nekoliko ključnih faktora:

- Temperature zagrijavanja,
- Trajanja procesa zagrijavanja,
- Vrste sredine u kojoj se zagrijavanje obavlja,
- Brzine hlađenja i prokaljivosti materijala.



Slika 1.9. Primjeri okaljenih mašinskih dijelova: lančanici za poljoprivredne mašine (lijevo) i konusni zupčanici za pogonske sisteme savremenih automobila (desno)



Slika 1.10. Izgled kalupa za kovanje radilice i izgled otkovka (lijevo) i indukciono kalenje ležišta radilice (desno)

Otpuštanje je termički proces u kojem se kaljeni čelik zagrijava na temperature ispod tačke AC_1 (u rasponu od 250 do 680 °C), zadržava na toj temperaturi određeno vrijeme, a potom

polako hladi. Ovaj postupak omogućava transformaciju nestabilne strukture kaljenog čelika u stabilniju formu. Glavni ciljevi otpuštanja su smanjenje ili potpuno uklanjanje unutrašnjih napona, smanjenje krtosti kaljenog čelika i postizanje željenih struktura i mehaničkih svojstava. Prema temperaturi na kojoj se proces izvodi, otpuštanje se dijeli na tri vrste: nisko, srednje i visoko.

Poboljšanje je termička obrada koja predstavlja kombinaciju kaljenja i visokog otpuštanja, s ciljem postizanja visokih vrijednosti napona tečenja i žilavosti. Ovaj postupak se najčešće primjenjuje na konstrukcione ugljenične čelike (sadržaj ugljenika 0,3–0,6%), kao i na nisko i srednje legirane čelike. Njegova važnost ogleda se u širokoj primjeni kod ključnih dijelova mašina, poput osovina, vratila, zupčanika i vijaka. Nakon poboljšanja, čelik postiže veću vrijednost napona tečenja i veće izduženje u poređenju s rezultatima prije kaljenja.



Slika 1.11. Primjeri primjene termičke obrade poboljšanja

Termohemijska obrada čelika je proces koji kombinuje termičko i hemijsko djelovanje s ciljem izmjene sastava, strukture i svojstava površinskog sloja materijala. Ovaj postupak primjenjuje se kako bi se poboljšale karakteristike površine, poput povećanja tvrdoće, otpornosti na habanje i otpornosti na koroziju. Najčešće primjenjivane metode termohemijske obrade uključuju cementaciju, nitriranje i hromiranje. Prema elementima koji prodiru u površinski sloj, razlikuju se različiti procesi. Cementacija podrazumijeva obogaćivanje površine ugljenikom, dok nitriranje obogaćuje azotom. Karbonitriranje i cijaniziranje kombinuju ugljenik i azot za poboljšanje svojstava površine. Hromiranje je proces u kojem se površinski sloj obogaćuje hromom, dok siliciranje uključuje obogaćivanje silicijumom. Alitiranje i boriranje podrazumijevaju dodavanje aluminijuma, odnosno bora, čime se postiže specifična otpornost i čvrstoća materijala.

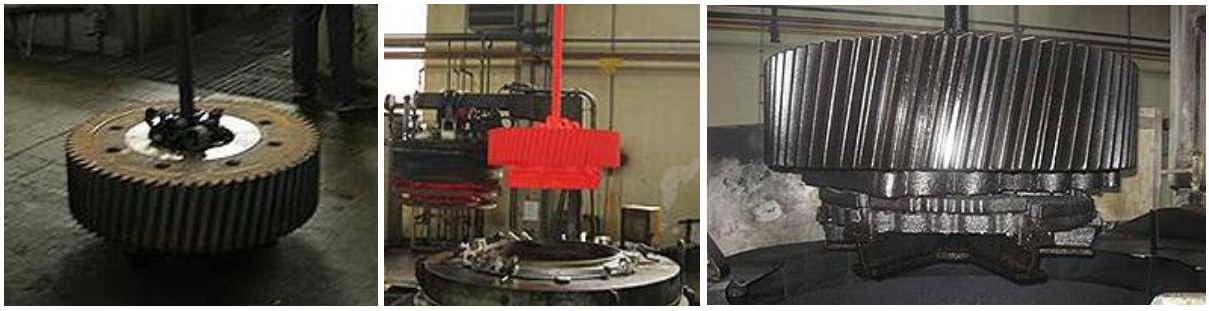
Tabela 1.3: Termohemijska obrada čelika

TERMOHEMIJSKA OBRADA	
Difuziono zasićenje nemetalima	Difuziono zasićenje metalima
Cementacija (čvrsta; tečna; gasovita) - obogaćivanje ugljenikom (C)	*Hromiranje* - obogaćivanje hromom (Cr)
Nitriranje (gasno; meko) - obogaćivanje azotom (N)	*Alitiranje* - obogaćivanje aluminijumom (Al)
Cijanizacija (gasno; tečno) - obogaćivanje ugljenikom i azotom (C i N)	*Siliciranje* - obogaćivanje silicijumom (Si)
Karbonitriranje - obogaćivanje ugljenikom i azotom (C i N)	*Beriliziranje* - obogaćivanje berilijumom (Be)
Sulfidizacija - obogaćivanje sumporom (S)	*Volframiranje* - obogaćivanje volframom (W)

Cementacija je termohemijski postupak kojim se površinski slojevi čelika obogaćuju ugljenikom (C). Konačna svojstva cementiranih dijelova postižu se nakon primjene kaljenja i

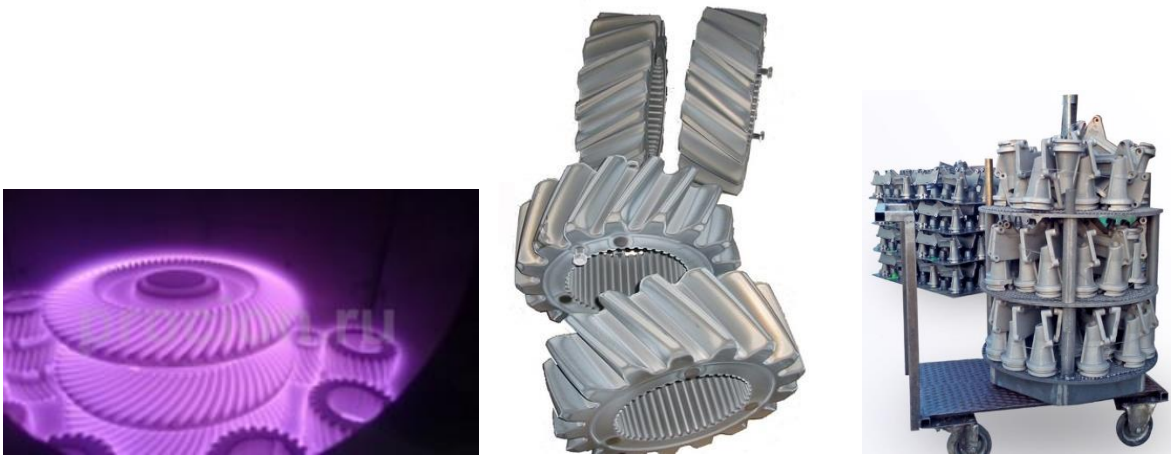
niskog otpuštanja. Osnovni cilj cementacije je postizanje visoke tvrdoće površinskog sloja (HRc 55-65), čime se osigurava velika otpornost na habanje. Ovom procesu najčešće se podvrgavaju niskougljenični čelici sa sadržajem ugljenika do 0,2% i legirani čelici sa sadržajem ugljenika od 0,08% do 0,2%.

Prije cementacije, dijelovi moraju biti adekvatno pripremljeni, što uključuje čišćenje i odmašćivanje površina, kao i zaštitu područja koja se ne cementiraju. Površine koje nisu predviđene za cementaciju premazuju se slojevima bakra, nikla ili specijalnim smjesama koje sadrže azbest, glinu, talk i tečno staklo, čime se sprečava prodiranje ugljenika u te dijelove.



Slika 1.12. Faze cementacije zupčanika: prije cementacije (lijevo), poslije cementacije a prije kaljenja (u sredini) i nakon cementacije i kaljenja (desno)

Nitriranje je termohemijski proces tokom kojeg se površinski sloj čelika obogaćuje atomima azota (N) putem difuzije. Cilj ovog procesa je povećanje tvrdoće, otpornosti na habanje i koroziju, kao i poboljšanje dinamičke čvrstoće materijala. Ova metoda se najčešće koristi za obradu dijelova motornih vozila, poput zupčanika, radilica i osovina, te različitih komponenti u industriji precizne mehanike. Pored toga, nitriranje se primjenjuje na dijelove pumpi (rotori i osovine), alate za brizganje polimera, alate za topli rad, kao što su oni za presovanje, kovanje i lijevanje, te na rezne alate, translatorne mehanizme, vodilice i mnoge druge komponente koje zahtijevaju visoku otpornost i dug vijek trajanja.



Slika 1.13. Proces nitriranja i dijelovi nakon nitriranja

Hromiranje to je termohemijski proces difuzionog obogaćivanja površinskog sloja čelika hromom Cr zagrijavanjem u odgovarajućoj sredini. Ovaj proces obezbeđuje površinskom sloju čelika: visoku tvrdoću, otpornost na habanje, toplotnu postojanost i otpornost na koroziju u sredini kao što su morska voda i azotna kiselina.



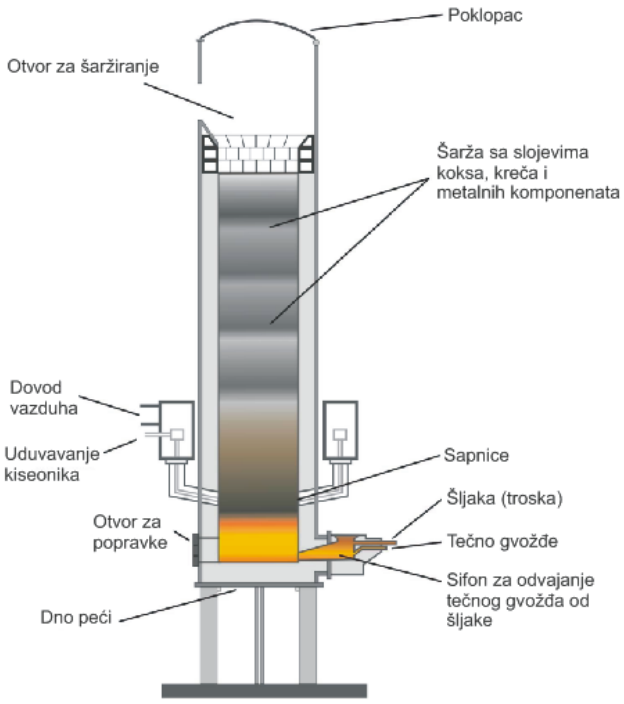
Slika 1.14. Proizvodi nakon hromiranja

1.1.1.1.2. Livena gvožđa

Livena gvožđa su legure željeza s udjelom ugljenika većim od 2,0%. U praksi se koriste livena gvožđa koja sadrže 2,0–4,0% ugljenika, 1–3% silicijuma, kao i mangan, fosfor i sumpor. Zbog značajnog uticaja silicijuma na osobine ovih legura, često se klasifikuju kao trojne legure Fe-C-Si. U mašinstvu se široko primjenjuju, uprkos nižoj plastičnosti, žilavosti i manjoj zateznoj čvrstoći u odnosu na čelik. Njihova upotreba je opravdana zbog odličnih svojstava livenja, širokog opsega čvrstoće i tvrdoće, dobre obradivosti rezanjem i niske cijene. Dodatno legiranje može značajno poboljšati tehnološka svojstva, kao što su otpornost na habanje i koroziju. Prednosti livenih gvožđa u poređenju s čelicima uključuju bolja svojstva livenja, nižu temperaturu topljenja (za 300–400 °C) i nižu cijenu.

Površinski defekti kod livenih gvožđa manje utiču na mehanička svojstva nego što je to slučaj kod čelika. Temperatura topljenja varira između 1150 °C i 1250 °C, zavisno od sadržaja ugljenika. Struktura livenog gvožđa prvenstveno zavisi od hemijskog sastava i brzine hlađenja odlivaka, što je ranije naglašeno.

Livena gvožđa se proizvode pretapanjem sivog livničkog gvožđa uz dodatak starog gvožđa, koksa i krečnjaka, pri temperaturama od 1100 °C do 1300 °C, u kupolnim, plamenim i električnim pećima (Slika 1.15). Liveno gvožđe se odlikuje dobrom livenošću i mogućnošću zavarivanja, ali nije pogodno za obradu plastičnom deformacijom.



Slika 1.15. Proizvodnja livenog gvožđa u kupolnim pećima.

Prema načinu livenja, sastavu i strukturi LG se dijela na:

1. *Sivo liveno gvožđe* (sivi liv -SL)

- Ugljenik (C) prisutan je u obliku lamelarnog grafita.
- Sadržaj ugljenika (C) ograničen je na maksimalno 4%.
- Sivo liveno gvožđe (SL) pokazuje otpornost na habanje i koroziju.
- Ima odličnu obradivost rezanjem.
- Odlikuje se dobrim toplotnim provodljivostima i sposobnošću prigušivanja vibracija.
- Odlivci od SL su jeftiniji od ostalih livova.

2. *Bijelo liveno gvožđe (bijeli tvrdi liv)* karakteriše se ugljenikom (C) koji je vezan u obliku cementita. Postoje dvije glavne vrste bijelog livenog gvožđa:

- Bijeli tvrdi liv (BTL) – Ugljenik je vezan u obliku cementita kroz cijeli poprečni presjek odlivka, što materijalu daje veliku tvrdoću i otpornost na habanje.
- Tvrdokorni tvrdi liv (TTL) – Cementit je prisutan samo u površinskom sloju, dok je unutrašnja struktura sastavljena od sivog livenog gvožđa (lamelarnog grafita).

Tvrdokorni tvrdi liv (TTL) ima izuzetno tvrdu površinu i dovoljno žilavo jezgro, što omogućava kombinaciju otpornosti na habanje i mehaničke otpornosti unutrašnjosti. Ova vrsta livenog gvožđa koristi se za proizvodnju dijelova koji su podložni intenzivnom habanju, kao što su kugle za mlinove, valjci, vagonski točkovi i dijelovi drobilica.

3. *Nodularno liveno gvožđe* (nodularni liv - NL)

- Ugljenik (C) u nodularnom livu (NL) izdvojen je u obliku kuglastog grafita (nodule-kuglice).

- Specifičan oblik izdvojenog grafita, uz smanjeni sadržaj štetnih primjesa, omogućava da NL ima znatno veću čvrstoću i žilavost u odnosu na sivo liveno gvožđe (SL).
- Prema starom standardu JUS C.J2.022, oznaka za nodularni liv je NL, uz brojčanu oznaku koja označava zateznu čvrstoću izraženu u MPa i izduženje u procentima. Na primjer, oznaka NL700-2 označava nodularni liv sa zateznom čvrstoćom od 700 MPa i izduženjem od 2%.
- Nodularni liv se koristi za izradu zahtjevnih dijelova, poput komponenti presa, mlinova, hidroturbina i automobila.

4. *Temperovani liv* (temper liv- TL)

- U temper livenom gvožđu (TL) ugljenik (C) se javlja u obliku temper-grafita.
- Temper liv se dobija procesom dugotrajnog žarenja bijelog livenog gvožđa na visokim temperaturama, pri čemu se ugljenik izdvaja u obliku temper-grafita. Postoje dvije vrste temper liva: bijeli i crni.
- Prema starom standardu JUS C.J2.021, oznaka za temper liv sastoji se od slovnih simbola: BTEL za bijeli temper liv i CTEL za crni temper liv. Prva brojčana vrijednost označava zateznu čvrstoću u MPa, umanjenu 10 puta, dok druga brojčana vrijednost predstavlja izduženje u procentima. Na primjer, oznaka BTEL 40-05 označava bijeli temper liv sa zateznom čvrstoćom od 400 MPa i izduženjem od 5%.

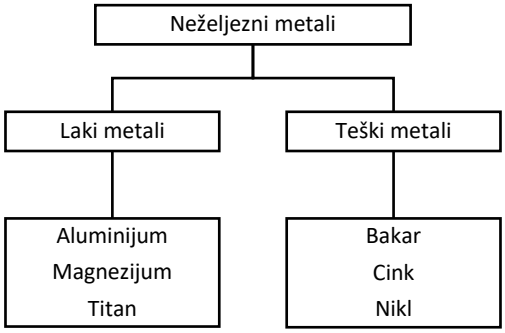
Temper liv ima dobru zateznu čvrstoću, žilavost, otpornost na koroziju, obradivost rezanjem i livkost.

Termička obrada livenih gvožđa primjenjuje se radi smanjenja unutrašnjih napona, poboljšanja mehaničkih svojstava i povećanja otpornosti na habanje. U tu svrhu odlivci livenih gvožđa podvrgavaju se žarenju, normalizaciji i kaljenju s otpuštanjem.

Žarenje za smanjenje unutrašnjih napona sprovodi se na odlivcima od sivog livenog gvožđa (SLG) i nodularnog liva (NL). Odlivci se zagrijavaju na temperature od 500 do 650 °C, zadržavaju se na toj temperaturi između 3 i 10 časova, u zavisnosti od dimenzija odlivaka, a zatim se polako hlade unutar peći. Ovaj postupak ne mijenja mehanička svojstva, ali smanjuje unutrašnje napone za 80–90%. Normalizacija se koristi za povećanje tvrdoće i otpornosti na habanje livenih gvožđa kroz formiranje perlitne strukture u metalnoj masi. Kaljenje s otpuštanjem primjenjuje se na odlivke od sivog livenog gvožđa (SLG), nodularnog liva (NL) i tvrdog liva (TL) kako bi se povećala čvrstoća, tvrdoća i otpornost na habanje.

1.1.1.2. Neželjezni metali

Iz prethodne podjele metalnih materijala pokazano je da se neželjezni meteli dijele u dvije grupe: laki metali i teški metali (Slika 16). Velika je raznovrsnost neželjeznih materijala za industrijsku primjenu i metalne konstrukcije, pa i raznovrsnost njihovih sirovina (ruda). U nastavku će kratko biti predstavljeni aluminijum i bakar kao najizrazitiji predstavnici grupa metala kojima pripadaju.



Slika 1.16. Podjela neželjeznih matala

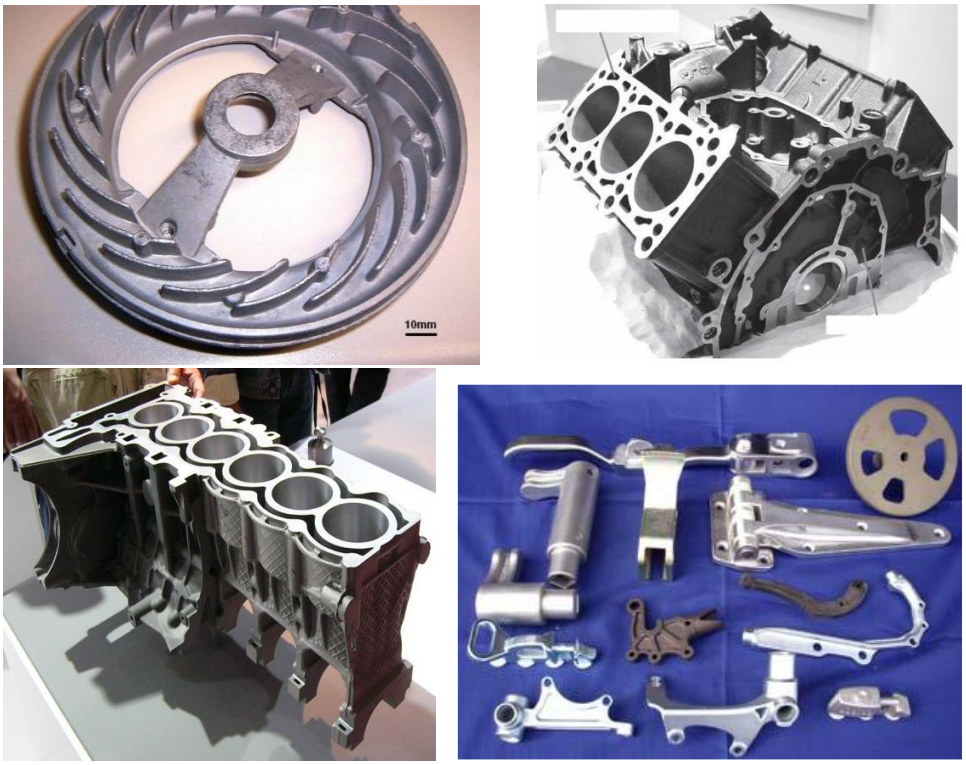
1.1.1.2.1. Laki metali

Aluminijum i legure aluminijuma

Aluminijum je najzastupljeniji metal u Zemljinoj kori, gdje se najčešće javlja u obliku aluminijum-oksida (Al_2O_3), prisutnog u glini, kaolinu i boksitu, s koncentracijom do 60% u boksitu. Karakteriše ga mala zapreminska masa od 2,7 kg/dm³, visoka otpornost na koroziju i hemikalije, kao i odlična provodljivost električne struje i toplote, što ga čini pogodnim za zamjenu bakra u provodnicima. Glavna ruda za dobijanje aluminijuma je boksit, koji je veoma rasprostranjen. Iako je proces dobijanja aluminijuma elektrolizom glinice poznat od 1825. godine, kada ga je prvi put proizveo Danac Hans Kristijan Ersted, aluminijum je u širu upotrebu ušao tek početkom 20. vijeka zbog komplikovanog i skupog procesa proizvodnje. Prema nekim izvorima, za proizvodnju jedne tone aluminijuma potrebno je oko 20.000 kWh električne energije. Aluminijum se široko koristi u auto i avio-industriji, građevinarstvu, elektrotehnici i mnogim drugim oblastima. Može se koristiti u čistom obliku ili kao legura. Na vazduhu se aluminijum prekriva čvrstim slojem oksida koji ga štiti od daljeg korodiranja, iako morska voda može uzrokovati njegovo razaranje. Materijal se lako oblikuje plastičnom deformacijom, pri čemu dolazi do promjena mehaničkih svojstava. Međutim, čist aluminijum nije pogodan za obradu livenjem, a zavaruje se specijalnim postupcima. Zbog male čvrstoće čistog aluminijuma, u tehničkim primjenama uglavnom se koriste njegove legure, koje imaju znatno bolje mehaničke karakteristike.

Legure aluminijuma dijele se na legure za gnječenje i legure za livenje. U grupu legura za gnječenje spadaju duraluminijum i superduraluminijum, koji predstavljaju složene legure bakra, mangana, molibdena, silicijuma i gvožđa. Duraluminijum se odlikuje dobrom čvrstoćom i tvrdoćom, ali je neotporan na koroziju. Radi zaštite, često se prevlači slojem čistog aluminijuma, što se naziva plakiranje. Može se podvrgnuti procesu kaljenja, a s vremenom otvrdnjava, što je poznato kao otvrdnjavanje starenjem. Međutim, duraluminijum se ne može zavarivati, pa se njegovi dijelovi spajaju zakovicama i zavrtnjevima izrađenim od istog materijala kako bi se spriječila elektrokorozija, koja nastaje zbog razlike u elektropotencijalima različitih materijala. Legure aluminijuma oznaka Y i RR koriste se za proizvodnju klipova motora s unutrašnjim sagorijevanjem. Klipovi izrađeni od ovih legura imaju bolja svojstva kada se proizvode presovanjem na hladno u poređenju s klipovima izrađenim livenjem. Karakterišu ih mala masa, dobra toplotna provodljivost i nizak koeficijent toplotnog širenja, što ih čini pogodnim za zahtjevne primjene u motorima.

Legure aluminijuma za livenje su izuzetne livkosti i omogućavaju izvanredno popunjavanje kalupa i izradu komplikovanih dijelova. Imaju jako dobra mehanička svojstva koja zadržavaju i na povišenim temperaturama. Glavne legure su Silumin, Bakar aluminijum i RR. Glavni nedostatak odlivaka od silumina je sklonost ka pojavi poroznosti usled sposobnosti upijanja gasova, što se sprečava očvršćavanjem pod pritiskom



Slika 1.17. Dijelovi I proizvodi izrađeni od aluminijuma

1.1.1.2.2. Teški metali

Bakar i legure bakra

Bakar je prvi metal koji je čovjek naučio koristiti, jer se u prirodi nalazio u čistom obliku, što je zabilježeno na područjima poput Iraka, Kipra i Amerike. Bakar (Cu) se odlikuje izuzetno dobrom električnom i toplotnom provodljivošću, otpornosti na djelovanje kiselina, baza i soli, postojanošću u atmosferskim uslovima i otpornošću na vlagu. Zbog ovih karakteristika, bakar nalazi široku primjenu u elektrotehnici, termotehnici, procesnoj i prehrambenoj industriji, građevinarstvu, kao i za platiranje i zaštitu od korozije. Najveći dio bakra dobija se iz sulfidnih ruda, među kojima su najznačajnije: halkosin (Cu_2S), kovelin (CuS), bornit (Cu_3FeS_4) i halkopirit ($CuFeS_2$). Proces dobijanja bakra iz ovih ruda odvija se u dvije faze. U prvoj fazi proizvodi se bakrenac, koji je smjesa bakarnog sulfida (Cu_2S) i željeznog sulfida (FeS). U drugoj fazi vrši se rafinacija bakrenca, koja se može izvoditi na dva načina:

- Elektrolitička rafinacija – dobija se elektrolitički bakar (99,9% Cu), koji se uglavnom koristi u elektrotehnici.
- Plamena rafinacija – proizvodi se topionički bakar, koji se koristi za dalju preradu, posebno u dobijanju legura bakra, poput mesinga i bronzi.

Bakar ima zapreminsku masu od 8,9 kg/dm³, što ga svrstava među teže metale, dok je njegova temperatura topljenja 1083 °C. Obradom deformacijom njegova čvrstoća se povećava, dok se kaljenjem smanjuje, što je suprotno ponašanju čelika. Zbog svoje izuzetne plastičnosti, bakar se lako obrađuje procesima valjanja, izvlačenja i presovanja, čak i u hladnom stanju. Međutim, teško se lije jer je sklon oksidaciji i lako upija gasove. Otporan je na koroziju i djelovanje slatke i morske vode, ali nije otporan na organske i neorganske kiseline, kao ni na amonijak, s kojim formira otrovna jedinjenja. Među ekonomičnim materijalima za provodnike, bakar je najbolji provodnik električne struje i toplote. Takođe se može zavarivati elektrolučnim i gasnim postupcima, a odlikuje se i dobrom mogućnošću lemljenja.

Legure bakra

- Bronza je legura bakra i kalaja (Slika 1.18).
- Mesing je legura bakra (60–90%) i cinka (40–10%) (Slika 1.19).
- Legura sastavljena od 88% bakra, 10% kalaja i 2% cinka odlikuje se velikom tvrdoćom i žilavošću. Ova legura je nekada korišćena za proizvodnju topova, dok se danas koristi za izradu brodskih pumpi i propelera.

Različiti sastavi ovih legura značajno utiču na njihova mehanička i druga svojstva, što ih čini pogodnim za širok spektar primjena.

Pored osnovnih legura, bakar se legira i sa aluminijumom, gvožđem, silicijumom, niklom, manganom, olovom, fosforom i drugim elementima, čime se dobijaju različite vrste bronzi koje se često koriste kao antifrikcioni materijali i za slične primjene.

- Kalajna bronza je legura bakra (Cu) sa do 20% kalaja (Sn). Odlikuje se dobrim mehaničkim svojstvima i izuzetnom otpornošću na habanje.
- Aluminijumska bronza je legura bakra (Cu) i aluminijuma (Al), poznata po dobroj livkosti i hemijskoj postojanosti.
- Berilijumova bronza je legura bakra (Cu) i berilijuma (Be), koja ima visoku elastičnost i koristi se za izradu opruga.
- Mesing je legura bakra (Cu) i cinka (Zn), sa odličnim mehaničkim svojstvima, dobrom livkošću, deformabilnošću i mogućnošću termičke obrade.



Slika 1.18. Proizvodi od kalajne, olovno-kalajne i aluminijumske bronze.

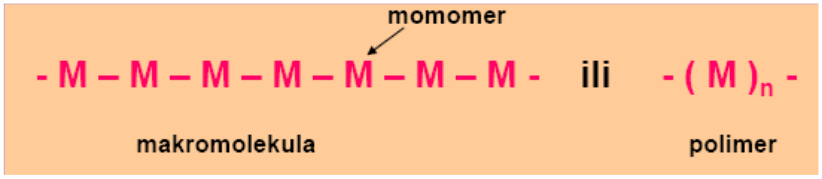


Slika 1.19. Proizvodi od mesinga

1.1.2. Polimerni materijali

Polimeri su dugački lanci molekula, poznati i kao makromolekuli ili džinovski molekuli. To su supstance nastale međusobnim povezivanjem molekulskih jedinjenja (monomera) koji se obično ponavljaju po određenom pravilu, stvarajući velike molekule (makromolekule). Polimeri nastaju u procesu polimerizacije, odnosno hemijskim povezivanjem monomera. Osnovni elementi koji ulaze u sastav plastičnih materijala su vodonik, kiseonik, ugljenik i azot, dok se pored njih često nalaze fluor, hlor, silicijum i sumpor.

Iako se pojam *polimer* često koristi kao sinonim za plastiku, u polimere se u hemiji ubraja veliki broj prirodnih i vještačkih materijala s različitim svojstvima i namjenama. Plastični materijali sve više zamjenjuju dijelove koji su ranije izrađivani od metala, npr. u automobilskoj i vazduhoplovnoj industriji, prehrambenoj i metaloprerađivačkoj proizvodnji, za izradu sportskih rekvizita i drugim oblastima industrijske proizvodnje.



Makromolekula – mnogo ponavljajućih jediniki M
Monomer (grč. monos = sam + meros = dio) - molekulske jedinice koje povezivanjem stvaraju polimer
Polimer (grč. poly = mnogo + meros = dio)

Slika 1.20. Nastanak polimera

Polimeri se, prema porijeklu, dijele na prirodne i sintetske. Prirodni polimeri prisutni su u velikom broju u prirodi, a neki od najpoznatijih primjera uključuju celulozu, drvo, gumu, pamuk, kožu, vunu, bjelančevine, kaučuk, svilu i enzime. Svi ovi materijali pripadaju grupi prirodnih polimera. S druge strane, savremena industrija proizvodi stotine sintetskih polimera, koji se danas široko koriste u različitim područjima zbog svojih specifičnih svojstava i prilagodljivosti tehničkim zahtjevima.

Sintetski polimeri su opšti naziv za poliplaste, koji uključuju plastomere, duromere, elastomere i elastoplastomere. U poliplaste se ubrajaju i sintetska vlakna te pomoćni polimerni materijali. Posebnim načinima prerade kod ovih materijala postignute su karakteristične osobine koje ih razlikuju od ostalih poliplasta. Najčešće se koriste u obliku rastvora ili disperzija u proizvodnji ljepila, lakova, premaza, sredstava za obradu kože, papira i tekstila. Riječ "polimer" prvi put se pojavljuje 1866. godine, označavajući molekul koji se

sastoji od mnogo dijelova (grčki: "poli" znači "mnogo", "meros" znači "dio"). Polimerni materijali sve se više koriste kao konstrukcioni materijali. Sintetski (vještački) polimeri danas se koriste u industrijskoj proizvodnji za izradu posuda za hranu i piće, različitih folija, medicinskih uređaja, igračaka, zupčanika, kućišta za računare, elektronskih proizvoda te karoserija i dijelova automobila.

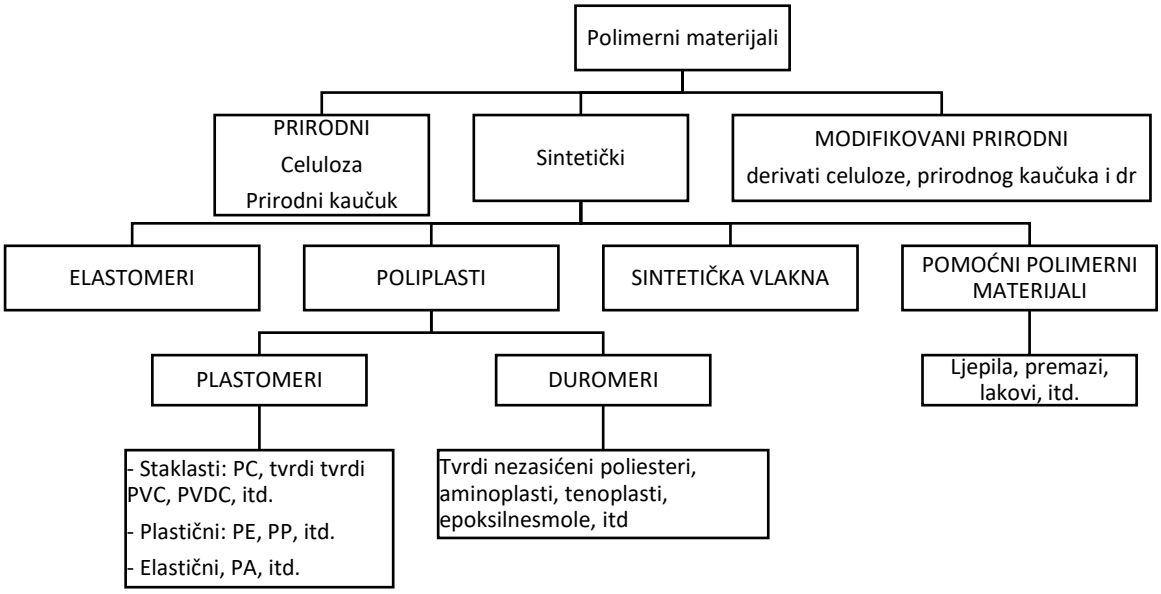
Sintetski polimeri predstavljaju jedan od najvažnijih materijala za intenzivan razvoj gotovo svih industrijskih grana. Mogu se proizvoditi iz uglja, biljnih sirovina, nafte i zemnog gasa. Sintetski polimeri su molekule ugljikovodika hemijski vezane sa nekim metalom ili nemetalom, a najveći dio sintetskih polimera dobija se preradom nafte.

Plastične mase imaju brojne prednosti u poređenju sa prirodnim materijalima: imaju malu gustoću, dobri su toplotni i električni izolatori,otporni su prema vodi, mnoge su otporne prema kiselinama i bazama, nisu izložene koroziji, lako se oblikuju. dobro upijaju vibracije, imaju niski koeficijent trenja, pa su otporni na trošenje. Glavni nedostaci su im slabe mehaničke osobine I slaba termička postojanost. Najveći udio utroška polimera imaju sektori građevinarstva i pakovanja, svaki sa po 27%. Zatim slijedi ostalo sa 16.5%, dok sektor kućne opreme zauzima 4.5%. Automobili i nameštaj imaju po 8%, dok sektor elektroindustrije čini 7%. Najmanji udio u distribuciji zauzima sektor poljoprivrede sa 2%.

Prema porijeklu polimerni materijali se mogu podijeliti na:

- Prirodni biopolimeri – obuhvataju materijale poput celuloze, škroba, keratina, kaučuka i drugih, koji se prirodno javljaju u biološkim sistemima.
- Polisintetski polimeri – hemijski modifikovani biopolimeri dobijeni iz prirodnih izvora, poput celuloze (npr. acetatna svila) ili bjelančevina (npr. kazein iz mlijeka).
- Organski sintetski (umjetni) polimeri – proizvedeni hemijskom sintezom, najčešće polimerizacijom jednostavnih organskih jedinjenja.
- Anorganski sintetski polimeri – dobijeni hemijskom sintezom, polimerizacijom jednostavnih organskih i neorganskih jedinjenja, s makromolekularnim lancem koji nije izgrađen od ugljenikovih atoma.

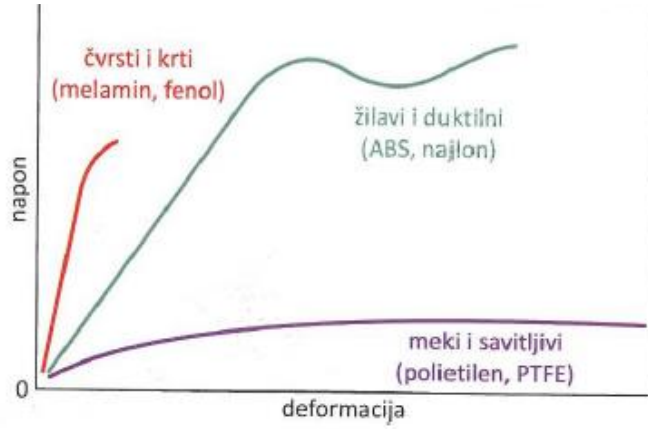
Svojstva nekog polimera zavise od sljedećih uticajnih faktora: strukture, molekulske mase, stepena polimerizacije, zastupljenosti amorfne odnosno kristalne strukture i aditiva. Prema svojstvima i oblasti primjene polimerne materijale dijelimo na sljedeće velike grupe materijala: termoplastične, termostabilne i elastomere, (Slika 1.21).



Slika 1.21. Podjela polimera prema porijeklu, namjeni i kvaliteti

Termoplastični polimeri imaju amorfnu ili djelimično kristalnu strukturu, sastavljenu od linearnih ili razgranatih makromolekula povezanih slabim sekundarnim vezama. Njihovo ponašanje pod opterećenjem značajno zavisi od temperature i stepena deformacije. Temperatura utiče na fleksibilnost i pokretljivost molekularnih lanaca, što dovodi do promjena u faznim stanjima, od staklastog do visoko elastičnog. S druge strane, stepen deformacije određuje prelaz iz elastičnog u plastično ponašanje, što može uzrokovati ireverzibilne strukturne promjene. Karakteristične krive napon-deformacija za pojedine termoplastične i termostabilne polimere na sobnoj temperaturi prikazane su na Slici 1.22. Ove krive služe za analizu mehaničkih svojstava i omogućavaju pravilan izbor materijala za inženjerske primjene.

Uticaj temperature na čvrstoću i krutost termoplastičnih polimera je sličan kao kod metala. Sa porastom temperature čvrstoća i modul elastičnosti se smanjuju, a žilavost se povećava. Kod termoplasta se deformabilnost zadržava stalno i proizvodi se mogu reciklirati. Za termoplaste je karakteristično da pod djelovanjem toplote omekšavaju a pri hlađenju otvrdnjavaju. U termoplaste ubrajamo: polistiren, polietilen, najlon, pleksiglas, teflon itd. Linearni i razgranati polimeri imaju slabe sekundarne veze. Pri zagrijavanju ovih polimera, iznad temperature prelaska u staklasto stanje, oni omekšavaju i mogu lako da se oblikuju, a poslije hlađenja njihova tvrdoća i čvrstoća vraćaju se na prvobitne vrijednosti.

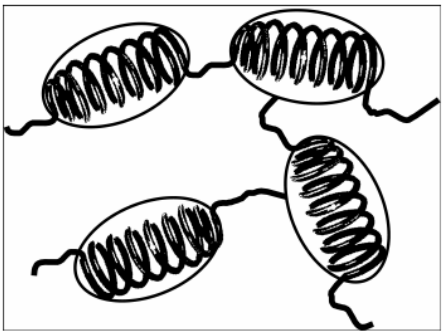


Slika 1.22. Karakteristična kriva napon-deformacija za određene polimere

Neki od važnijih termoplastičnih polimerasu: polietileni (PE), polivinih hloridi (PVC), Polistireni (PS), Polimeril metakrilati (PMMA), Politetrafluoretilen (PTFE), Poliamidi (PA), Poliestri (PET), Polikarbonati (PC).

Termostabilni polimeri (duroplasti) očvršćavaju tokom prerade na povišenim temperaturama ili pod uticajem svjetlosti, što uzrokuje hemijske reakcije koje dovode do nepovratnog umrežavanja makromolekula. Zbog toga se ovi polimeri nazivaju i termoumreženim polimerima. U literaturi se sreću pod imenima termostabilni, duroplasti, duromeri ili termoumreženi polimeri. Na sobnoj temperaturi duroplasti su tvrdi i krti, ne rastvaraju se i gube deformabilnost nakon očvršćavanja. Prilikom zagrijavanja otvrdnjavaju, dobijaju konačni oblik i više se ne mogu plastično oblikovati. Primjeri duroplasta su bakelit, guma, silikon i epoksi smole. Na visokim temperaturama duroplasti se ne tope niti gore, već se ugljenišu i razgrađuju. U industrijskoj praksi polimeri se dijele na plastike i elastomere. Plastike se proizvode polimerizacijom ili polikondenzacijom, dok se elastomeri dobijaju vulkanizacijom. Važniji termoreaktivni polimeri su fenolne smole (PF), melaminske smole (MF), urea smole (UF) i epoksidi (EP). Za razliku od termoplastičnih polimera, termoreaktivni se ne mogu ponovno zagrijavati ni pretapati, što otežava reciklažu. Ipak, njihova prednost leži u odličnim mehaničkim svojstvima, visokoj otpornosti na puzanje i deformacije, kao i u termičkoj, hemijskoj i dimenzionalnoj stabilnosti. Osim toga, imaju izvrsnu električnu, toplotnu i izolacionu otpornost, što ih čini pogodnim za tehničke primjene.

Elastomeri, poznati i kao gume, uključuju prirodne i sintetske kaučuke, silikone i poliuretane. Ovi materijali na sobnoj temperaturi mogu se istegnuti do najmanje dvostruke izvorne dužine, a po prestanku djelovanja vanjske sile brzo se vraćaju u prvobitni oblik. Njihove makromolekule imaju strukturu nalik opruzi, što omogućava istezanje do 100% početne dužine (Slika 1.23). Elastomeri se odlikuju malim modulom elastičnosti i sposobnošću reverzibilne deformacije u širokom temperaturnom rasponu. Pod djelovanjem vanjskog opterećenja elastično se deformišu, mijenjajući oblik i dimenzije, dok se nakon rasterećenja vraćaju u prvobitni oblik bez trajnih deformacija. Elastomeri se dobijaju prevođenjem prirodnog ili sintetičkog kaučuka u umreženu strukturu. Među njima se razlikuju prirodne, neoprenske, silikonske i uretanske gume, koje se koriste u raznim tehničkim i industrijskim primjenama.





Slika 1.23. Shema makromolekula elastomera Slika 1.24. Skijaška cipela od elastoplastomernog poliuretana

Tabela 1.4: Podjela proizvodnih postupaka prerade plastičnih masa prema vrsti plastike

Proizvodni postupak	Tip plastike		
	TERMOPLASTI	DUROPLASTI	ELASTOMERI
LIVENJE	Presovanje: direktno i indirektno	Presovanje: direktno i indirektno	Presovanje: direktno i indirektno
	Ekstrudiranje	Ekstrudiranje	Ekstrudiranje
	Injekciono presovanje	Injekciono presovanje	Injekciono presovanje
	Prerada duvanjem	Laminiranje	Pjenušanje
DEFORMISANJE	Toplo oblikovanje	Nije moguće	
	Hladno oblikovanje		
RAZDVAJANJE	Obrada rezanjem		
SPAJANJE	Zavarivanje	Nije zavarljivo	
	Lijepljenje, Spajanje pomoćnim sredstvima		
ZAŠTITA	Lakiranje, Galvanizacija	Štampanje, Toplo utiskivanje	Nije uobičajeno

U posljednje vrijeme razvijena je posebna grupa polimera, tzv. ***elastoplastomeri***, koji se prerađuju poput plastomera, ali imaju elastična svojstva slična elastomerima (Slika 1.24). Ove podjele su ključne pri projektovanju dijelova od plastičnih masa, gdje izbor materijala mora odgovarati tehničkim i eksploatacionim zahtjevima proizvoda. Prerada polimera zavisi od njihove prirode. Termoplastični materijali oblikuju se procesima poput ekstrudiranja, brizganja i valjanja, dok se termoreaktivni polimeri prerađuju livenjem pod pritiskom ili prenošenjem. Polazna sirovina dolazi u obliku ljuspica, praha, tečnosti ili granula.

Zbog ekonomskih i tehničkih prednosti, plastične mase široko se koriste u savremenoj industriji. Ključne karakteristike za izbor su čvrstoća, žilavost, obradivost, izdržljivost, termičke, hemijske i električne osobine, te cijena. Polimeri ojačani vlaknima (FRP) nalaze primjenu u građevinarstvu, mašinstvu i elektrotehnici. Njihova upotreba u Japanu naglo je porasla nakon potresa 1995. godine u Kobeu, koji je razorio mnoge mostove (Slika 1.25).



Slika 1.25. Primjena FRP materijala u građevinarstvu.

1.1.3. Keramički materijali

Keramički materijali su neorganska jedinjenja koja nastaju povezivanjem metala i nemetala, uključujući staklo, keramiku, grafit, dijamant, okside, karbide i nitride, pri čemu su atomi povezani jonskim i/ili kovalentnim vezama. Njihova struktura može biti kristalna ili kombinacija kristalne i nekristalne faze. Osobine keramičkih materijala znatno variraju zbog različitih vrsta atomskih veza.

Ovi materijali se generalno odlikuju velikom tvrdoćom i krtošću, niskom plastičnošću, dobrom električnom i toplotnom izolacijom, te otpornosti na habanje, koroziju i hemijske uticaje. Takođe imaju visoke temperature topljenja i odličnu stabilnost u različitim okruženjima, ali su osjetljivi na udarne sile. Zahvaljujući tim karakteristikama, keramički materijali imaju široku primjenu u inženjerskim oblastima. Njihova raznovrsnost proističe iz velikog broja mogućih hemijskih kombinacija, što omogućava prilagođavanje različitim industrijskim potrebama.

Keramički materijali dijele se u dvije osnovne kategorije: tradicionalna keramika i industrijska keramika.

Tradicionalna keramika izrađuje se od gline, silicijum dioksida (SiO_2) i feldspata (minerala koji sadrži aluminijum, silikate, kalcijum, kalijum i natrijum). Ova vrsta keramike koristi se za proizvodnju opeka i pločica u građevinarstvu, kao i elektroizolacionog porcelana za visokonaponske sisteme.

Industrijska keramika sastoji se od čistih ili gotovo čistih hemijskih jedinjenja, kao što su aluminijum oksid (Al_2O_3), cirkonijum oksid (ZrO_2), volfram karbid (WC), silicijum karbid (SiC), silicijum nitrid (Si_3N_4), bor karbid (B_4C) i bor nitrid (BN). Ova vrsta keramike koristi se u visokotehnološkim aplikacijama, poput komponenti gasnih turbina koje rade na visokim temperaturama, kao i u motorima s unutrašnjim sagorijevanjem za svjećice, prevlake na klipovima i izduvne grane.

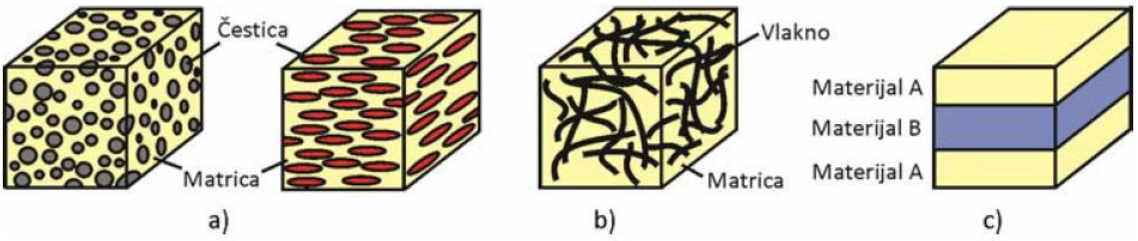
Tabela 1.5. Najvažnije oblasti primjene keramičkih materijala (Zrilić i Dobraš, 2018b)

Tradicionalna keramika	
Abrasivni materijali	Brusne ploče, brusni papiri, mlaznice uređaja za pjeskarenje, kugle mlinova
Proizvodi od gline	Opeke, grnčarija, kanalizacione cijevi
U građevinarstvu	Opeke, pločice, beton, gips
Vatrostalni materijal	Opeke, lonci za topljenje metala, kalupi
Industrijska keramika	
U autoindustriji i aerokosmonautici	Komponente gasnih turbina i izduvnog sistema motora, toplotni bojleri, zaptivke
U elektronici	Poluprovodnici, izolatori, grejna tijela, laseri, optička vlakna
U mašinstvu	Dijelovi alata za obradu metala i sječenje, dijelovi otporni na habanje i koroziju, magneti
U medicini	Laboratorijska oprema, protetičke naprave

1.1.4. Kompozitni materijali

Mnoge savremene tehnologije zahtijevaju materijale s kombinacijom svojstava koja nemaju ni metali ni njihove legure, ni keramički materijali, ni polimeri. Kao primjer mogu da se navedu komponente avionskih konstrukcija, gdje se od materijala zahtijeva mala gustina, velika čvrstoća i velika krutost. Od nekih komponenti avionskih motora zahtijeva se: mala gustoća, velika čvrstoća i krutost, velika otpornost na abraziju i koroziju. Ovakva svojstva imaju *kompozitni materijali (kompoziti)***,** koji predstavljaju kombinaciju dva ili više materijala sa različitim svojstvima u mikro i/ili makroskopskoj razmjeri. Odgovarajućim izborom komponenti i njihovim odnosom u strukturi kompozitnog materijala, mogu se dobiti materijali sa željenim osobinama koje uključuju: čvrstoću, krutost, otpornost na koroziju, otpornost na habanje, toplotnu i akustičnu izolaciju i malu masu. Sve navedene osobine ne mogu se postići istovremeno, niti se to zahtijeva.

Kompoziti mogu biti: *ojačani česticama, ojačani vlaknima i laminatni*. Kompozitni materijali su tako građeni da koriste najbolja svojstva svake pojedine komponente, obezbjeđujući tako tražena svojstva**.**

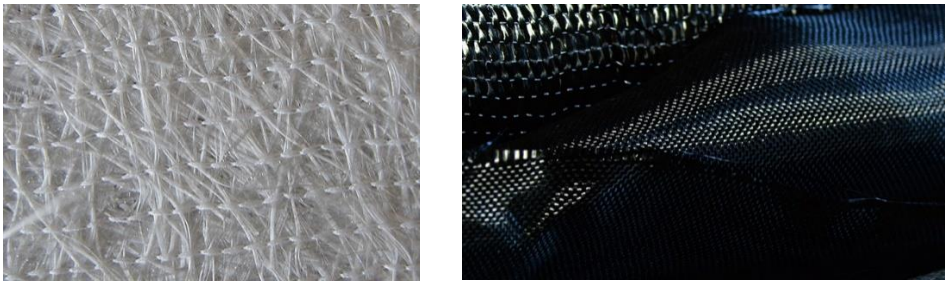


Slika 1.26. Tri tipa kompozitnih materijala: a) česticama ojačani, b) vlaknima ojačan, c) laminatni

Česticama ojačan kompozitni materijal sastoji se od veće količine čestica različitog geometrijskog oblika, približno istih dimenzija u svim pravcima. Veličina čestica ima uticaj na

osobine kompozitnih materijala. Količina čestica, tj. koncentracija, ima uticaj na osobine. Uobičajen udio čestica je 30-40% zapremine kompozita. Beton je kompozit ojačan česticama, koji predstavlja mješavinu cementa i šljunka/pjeska. Materijali pod imenom *kermeti* su grupa česticama ojačanih kompozitnih materijala, koji predstavljaju kombinaciju keramičkih materijala i metala. *Materijali za električne kontakte*, kod prekidača i releja, moraju biti otporni na habanje i imati dobru električnu provodljivost. U tom cilju, prave se česticama ojačani kompoziti, koji su sastavljeni od srebra ojačanog česticama volframa.

Vlaknima ojačani kompozitni materijali dobiju se sjedinjavanjem: čvrstih, krutih ili krtih vlakana (prekidna i disperzna faza), sa mekom i plastičnom matricom (neprekidna faza). Za izradu vlaknima ojačanih kompozitnih materijala koristi se širok opseg: polimernih, metalnih i keramičkih materijala, koji služe kako za vlakna, tako i za matrice. Istraživanje i razvoj vlaknima ojačanih kompozita ide u pravcu povećanja: čvrstoće, krutosti, otpornosti na povišenim temperaturama, postojanosti u određenim radnim sredinama i pouzdanosti u radu. Stakloplastika je kompozit ojačan vlaknima, jer je sačinjena od staklenih vlakana ubačenih u matricu od polimera (Callister i Rethwisch, 2020).



Slika 1.27. Staklena vlakna (lijevo), karbonska vlakna (desno)

Laminatni kompozitni materijali su kompozitni materijali koji su slojevite konstrukcije. Sastoje od tankih slojeva, napravljenih od istih ili različitih materijala, koji su složeni sa različitom orijentacijom pravaca maksimalne čvrstoće i međusobno čvrsto povezani. Osobine ovih materijala variraju u zavisnosti od orijentacije vlakana u pojedinim slojevima, pa su laminatni kompozitni materijali anizotropni. Raničite su namjene pa ih je moguće napraviti tako da se dobiju tačno definisane osobine: mala gustina i cijena, velika čvrstoća i krutost u više ravni, abrazivna, hemijska i temperaturna postojanost. To se postiže nanošenjem slojeva na osnovni materijal. Moguće je ostvariti različite kombinacije materijala, kao što su šperploče, bimetali, slojeviti metali i laminati od vlaknima ojačanih kompozitnih materijala u obliku tankih slojeva. Šperploča predstavlja laminatni kompozit koji se sastoji od unakrsno lijepljenih furnira drveta, čime se postiže povećana čvrstoća i stabilnost. Sigurnosna stakla su laminati u kojima su dva sloja stakla povezana plastičnim ljepilom, najčešće polivinil butiralom. Ovo ljepilo sprečava da se, prilikom razbijanja, dijelovi stakla razlete, čime se smanjuje rizik od povreda.

1.2. Svojstva i ispitivanje materijala

Svojstva metala i legura se dijele se u četiri grupe: hemijska, fizička, mehanička i tehnološka svojstva. Osnovno svojstvo je *hemijski sastav* od koga nadalje bitno zavise ostala svojstva. Materijali koji se koriste za izradu dijelova i proizvoda mogu biti prirodni ili vještački, metalne ili nemetalne osnove. Na izbor materijala za izradu nekog proizvoda utiče niz faktora:

mogućnost nabavke materijala, cijena materijala, osobine materijala koje moraju zadovoljiti tačno određene zahtjeve u pogledu režima rada: agresivnost okoline, radna temperatura, hidrostatički i radni pritisak, otpornost na vanjska opterećenja. Osobine (svojstva) materijala, mogu se svrstati u sljedeće kategorije:

- Strukturne osobine,
- Fizičke osobine,
- Mehaničke osobine,
- Tehnološke osobine,
- Modifikovane osobine,
- Specifične osobine.

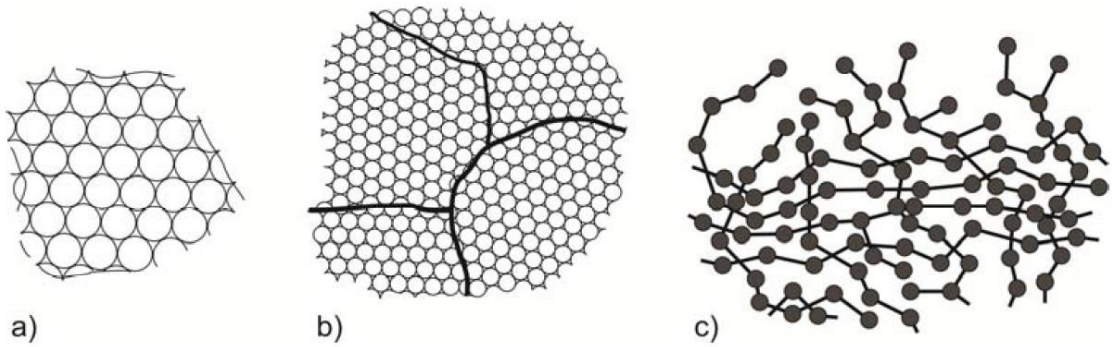
1.2.1. Strukturne, fizičke i hemijske osobine.

Materijali koji nas okružuju mogu se pojaviti u tri agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom. Čvrsto stanje materije formira se samo kada između atoma, jona i molekula postoji određena vrsta veze. Kada atomi ili joni u čvrstom tijelu zauzimaju pravilan trodimenzionalni raspored u prostoru, takvo tijelo se naziva kristalnim. Ako je ovaj pravilan raspored prisutan kroz cijeli volumen materijala, taj materijal nazivamo monokristalom. Monokristali se odlikuju anizotropijom, što znači da u različitim pravcima pokazuju različita fizička svojstva, poput elastičnosti, indeksa loma svjetlosti, magnetizacije i toplotne provodljivosti.

Kada je pravilan raspored atoma prisutan samo na manjim područjima unutar materijala, ali se ponavlja na mnogo mjesta s različitim orijentacijama, govorimo o polikristalnim materijalima. Takvi materijali pokazuju kvazi izotropnost, pri čemu se zbog nasumične orijentacije kristalnih zrna poništava anizotropija na nivou realnih komada metala, iako je svako pojedinačno kristalno zrno anizotropno. Polikristali prelaze iz čvrste u tečnu fazu pri tačno definisanoj temperaturi, odnosno imaju jasno određenu tačku topljenja.

Nasuprot kristalnim strukturama, čvrsto tijelo može imati potpuno nepravilnu građu, bez ponavljanja trodimenzionalnih obrazaca atoma, što se naziva amorfnom strukturom. Amorfni materijali se sastoje od dugih lančastih molekula i izotropni su, što znači da imaju ista fizička i mehanička svojstva u svim pravcima. Među amorfnim materijalima nalaze se staklo, veliki broj plastičnih materijala i neki metali koji se, tokom očvršćavanja, hlade ekstremno velikim brzinama.

Metalni materijali su kristalna tijela koja se sastoje od mnogobrojnih kristalnih zrna ili kristalita. Atomi unutar ovih materijala raspoređeni su u pravilnom trodimenzionalnom obrascu. Najmanja jedinica ovog pravilnog rasporeda, koja se dalje ponavlja u prostoru sa istim karakteristikama, naziva se jediničnom ćelijom ili kristalnom rešetkom.



Slika 1.28. Strukture čvrstog tijela: a) monokristalna, b) polikristalna, c) amorfna (Zrilić i Dobraš, 2018a)

Iako se većina metalnih materijala odlikuje jedinstvenom kristalnom rešetkom, postoje i oni koji mogu da imaju više različitih kristalnih rešetki. Ovo svojstvo je naziva ***alotropija*** ili polimorfija, a preobražaj jednog tipa rešetke u drugu (alotropski preobražaj) je funkcija temperature. Polimorfni oblici se razlikuju ne samo po kristalnoj rešetki, nego im se i osobine znatno razlikuju.

Hemijske osobine materijala su karakteristike materijala povezane sa strukturom materijala i rasporedom elemenata. Ta se svojstva se određuju u hemijskim laboratorijima.

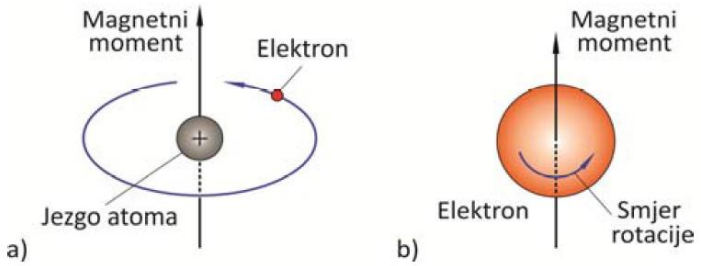
Fizičke osobine materijala su karakteristike koje se odnose na interakciju tih materijala s različitim vrstama energije i drugim materijalnim tijelima. To su osobine zasnovane na zakonima fizike i mogu se odrediti bez uništavanja ili mijenjanja (strukture) materijala. Fizičke osobine materijala važne su pri izboru i obradi materijala. Najvažnije fizičke osobine materijala su: agregatno stanje, boja, svjetlosna propustljivost, gustina, temperature: topljenja, ključanja i isparavanja, specifična toplotna kapacitivnost, toplotna provodljivost, koeficijent linearnog širenja, električne i magnetne osobine i radioaktivnost.

1.2.2. Električne i magnetne osobine

Električne osobine - Jedna od najvažnijih električnih karakteristika čvrstih materijala je njihova električna otpornost. Prema Omovom zakonu $I = U/R$, gdje je I intenzitet struje kroz provodnik a U je napon. Električni otpor (R) zavisi od prirode materijala provodnika, njegove dužine (l) i poprečnog presjeka (A). Ove su veličine povezane preko konstante materijala, koja se naziva specifična električna otpornost (ρ), tako što je: $R = \rho \cdot l/A$, odnosno, $\rho = R \cdot A/l$. Jedinica za specifičnu električnu otpornost je Ω·m. Kaže se da je ovo karakteristika koja pokazuje „lakoću“ proticanja struje kroz provodnik, a jednostavnije ju je nazvati električna provodljivost (σ), koja se definiše kao recipročna vrijednost specifične električne otpornosti (ρ), tj: $\sigma = 1/\rho$. Jedinica za električnu provodljivost je $(\Omega m)^{-1}$, što predstavlja električnu provodljivost provodnika koji ima električni otpor od 1 Ω.

Magnetne osobine materijala. Ove osobine materijala se određuju na način da se određeni uzorak materijala unosi u nehomogeno magnetno polje, pri čemu se na podesan način registruje nastanak sile između uzorka i magnetnog polja. Nastala sila zavisi od vrste uzorka, odnosno može biti odbojna, kada nastaje spontana težnja da se uzorak izbaci iz magnetnog

polja, ili privlačna, kada ta sila uvlači uzorak u dio prostora gdje je polje jače. Magnetne osobine materijala mogu se objasniti postojanjem elementarnih magnetnih momenata (dipola), koji nastaju kao posljedica kruženja elektrona oko jezgra atoma i magnetnog momenta sopstvene rotacije elektrona (Slika 1.29).



Slika 1.29. Šematski prikaz magnetnog momenta: a) od kruženja elektrona, b) od sopstvene rotacije elektrona (Zrilić i Dobraš, 2018a).

U materijalima može postojati slabo i jako magnetno uređenje koje zavisi od stepena interakcije ovih magnetnih momenata. Magnetno uređenje se karakteriše posredstvom magnetne propustljivosti – magnetnog permeabiliteta μ, koji predstavlja koeficijent proporcionalnosti između jačine magnetnog polja H (A/m) i magnetne indukcije B (Wb/m^2) :

$$B = \mu \cdot H$$

Magnetni permeabilitet μ zavisi od osobina materijala kroz koji prolazi magnetno polje H i čija se magnetna indukcija B mjeri. Magnetni permeabilitet u vakumu μ_o ima vrijednost 1, 257·10-6 H/m. Odnos magnetnog permeabiliteta μ nekog materijala i permeabiliteta u vakuumu μ_o, naziva se relativni magnetni permeabilitet: $\mu_r = \mu/\mu_o$.

Prema magnetnim osobinama, sve materijale dijelimo u tri osnovne grupe:

Dijamagnetni materijali (dijamagnetici) imaju vrlo slabo izražene magnetne osobine i ne funkcionišu kao stalni magneti. Oni postaju magnetisani samo u prisustvu spoljašnjeg magnetnog polja. Kod ovih materijala magnetna permeabilnost je nešto manja od permeabilnosti vakuuma, tj. μr < 1, jer se unutrašnje magnetno polje suprotstavlja spoljašnjem. Primjeri dijamagnetnih materijala su voda, bizmut i bakar.

Paramagnetni materijali (paramagnetici) karakterišu se time da im je magnetna permeabilnost malo veća od permeabilnosti vakuuma, odnosno μr > 1, jer se unutrašnje magnetno polje poklapa sa spoljašnjim. Primjeri paramagnetnih materijala uključuju platinu, vazduh i aluminijum. Dijamagnetici i paramagnetici se zajednički nazivaju nemagnetnim materijalima, jer je njihova magnetna permeabilnost približno jednaka permeabilnosti vakuuma (μ ≈ μo), te nemaju značajniju primjenu u izradi magnetnih kola.

Feromagnetni materijali (feromagnetici) spadaju u grupu materijala sa vrlo visokom magnetnom permeabilnošću, koja može biti višestruko veća od permeabilnosti vakuuma (μr » 1), dostižući vrijednosti od nekoliko hiljada do stotina hiljada. Osim mekog gvožđa, u ovu grupu pripadaju kobalt, nikl i njihove različite legure. Iako nisu stalni magneti, ovi materijali, kada se nađu u spoljašnjem magnetnom polju, spontano orijentišu svoje magnetne domene

u pravcu polja. Za razliku od dijamagnetika i paramagnetika, feromagnetici zadržavaju stalni magnetni moment čak i u odsustvu spoljašnjeg magnetnog polja.

1.2.3. Tehnološke osobine

Metali posjeduju određene osobine koje su jako bitne za mašinsku i metaloprerađivačku industriju, a koje se ne mogu ubrojiti u fizičke, hemijske ili mehaničke osobine. Svrstavamo ih u tehnološke i specifične osobine matala.

Najvažnije tehnološke osobine metala su:

- Livkost,
- Obradivost materijala rezanjem,
- Obradivost plastičnom deformacijom,
- Zavarljivost,
- Zakaljivost.

Livkost predstavlja sposobnost nekog metala ili legure da pri ulijevanju rastopljene mase u kalup, napravljen od tačno definisanog materijala, u potpunosti ispuni šupljinu kalupa, pri čemu se nakon očvršćavanja dobije odlivak koji zadovoljava unaprijed zadati kvalitet u pogledu oblika, dimenzija, kvaliteta isl.

Definicija za ***obradivost materijala rezanjem*** je: *Obradivost materijala je sposobnost materijala da se, na alatnim mašinama, lakše ili teže obradi uklanjenjem viška materijala u obliku strugotine, uz postizanje minimalnih troškova obrade i dobar kvalitet obrađene površine.*

Kod obrade rezanjem, može doći do stvaranja diskontinuirane ili kontinuirane strugotine. Diskontinuirana strugotina se stvara u uslovima kada dolazi do loma metala ispred rezne oštrice, tj. reznog klina. Ukoliko se metal prilikom rezanja plastično deformiše i ne lomi ispred reznog klina alata, stvara se kontinuirana strugotina. Pošto kontinuirana strugotina otežava rad, jer se stvara dugačka trakasta strugotina, materijal sa dobrom obradivošću treba imati malu duktilnost. Materijali manje tvrdoće su lakše obradivi rezanjem jer alat lakše prodire u materijal. Poznato je da legure magnezijuma imaju malu duktilnost i nisku tvrdoću pa su lako obradive rezanjem. Npr. bijelo sirovo gvožđe je tvrdo i krto i teško se obrađuje rezanjem, ali se termičkom obradom žaretnjem dobija meki temper liv koji ima bolju obradivost. Čelici se legiraju sumporom do 0,3%, a mogu se legirati još i olovom, selenom ili telurom kako bi im se poboljšala obradivost rezanjem. Obradivost rezanjem mesinga se znatno povećava ako se legira sa olovom do 3%. Kod legura aluminijuma, obradivost rezanjem se znatno povećava dodavanjam manjih količina Pb ili Bi.

Obradivost plastičnom deformacijom predstavlja osobinu metalnih materijala da pod dejstvom vanjskih sila (u hladnom ili toplom stanju), mogu da mijenjaju svoj oblik i dimenzije primjenom neke od tehnologija plastične deformacije: kovanje, valjanje, izvlačenje, presovanje, savijanje, uvijanje, itd., a da se pod dejstvom tih sila u materijalu ne pojavi pukotina ili lom. Obradivost plastičnom deformacijom poboljšava se obradom na povišenim

temperaturama (u toplom stanju), pošto se povećanjem temperature metala slabe međuatomske veze i olakšava klizanje kristalografskih ravni, te su potrebne manje sile deformacije, a deformacija kristalnih zrna je manja.

Zavarivanje je tehnologija spajanja dva ili više dijelova u jednu nerazdvojivu cjelinu. Sposobnost nekog metala ili legure da ostvari zavareni spoj zadovoljavajućih osobina naziva se ***zavarljivost,*** a ostvaren određenim postupkom, u određenom položaju zavarivanja, uz tačno definisane parametre zavarivanja,

Dobra zavarljivost nekog metala jednom metodom zavarivanja ne podrazumijeva da će kvalitet zavarenog spoja biti dobar ako je zavarivanje izvedeno primjenom druge metode ili drugih parametrima zavarivanja. Ocjena zavarljivosti nekog materijala određenim postupkom zavarivanja provodi se primjenom različitih metoda ispitivanja (vizielne, metalografske metode, metode mehanike loma i dr.).

1.2.4. Specifične osobine materijala

U ove osobine materijala ubrajaju se one koje se odnose na specifične uslove rada mašinskih dijelova i konstrukcija kao što su: agresivnost radne atmosfere, hemijski uticaji, uticaj temperaturnih ciklusa i maksimalne temperature, otpornost na habanje i sl. Ove osobine se zahtijevaju od materijala pri datim radnim uslovima, a po svom karakteru nisu ni fizičke ni mehaničke osobine, te se nazivaju specifične osobine materijala.

Hemijska postojanost je otpornost materijala na hemijsko ili elektrohemijsko razaranje površinskog sloja, a koje je uzrokovano djelovanjem radne atmosfere ili različitog elektropotencijala materijala kod dijelova čije su površine u dodiru.

Temperaturna postojanost je sposobnost materijala, da u određenom temperaturnom interval, zadrži projektovane osobine. S obzirom da materijali imaju različite osobine na sobnoj, povišenoj ili sniženoj temperaturi, cilj je odabrati onaj materijal koji će svojim osobinama najbolje zadovoljiti projektovane radne uslove jer ne treba zaboraviti činjenicu da se sa promjenom temperature mijenja I struktura materijala a sa time I mehaničke I druge osobine materijala.

Habanje se može definisati kao postepeno mehaničko trošenje dodirnih površina metala, pri međusobnom kontaktu dvije metalne površine, ili jedne metalne površine sa drugim materijalom.

Otpor materijala habanju je složena pojava koja zavisi od mnogo faktora. Razlikuju se sljedeći vidovi habanja materijala: abrazija, adhezija ,difuzija, oksidacija, zamor materijala itd. U slučaju trenja metalne površine sa tečnošću ili gasom u pokretu, nastaje erozija. Habanje metalnih površina se znatno smanjuje ako su te površine glatkkije odnosno boljeg kvaliteta obarade, ako su materijali veće tvrdoće I duktilnosti. Smanjenje havbanja se postiže pravilnim izborom vrste maziva I vrste podmazivanja.

Najefikasnije metode za povećanje otpornosti na habanje su: podmazivanje,glatka i homogena površina,suzbijanje pojave korozije. Orpornost na habanje se takođe povećava

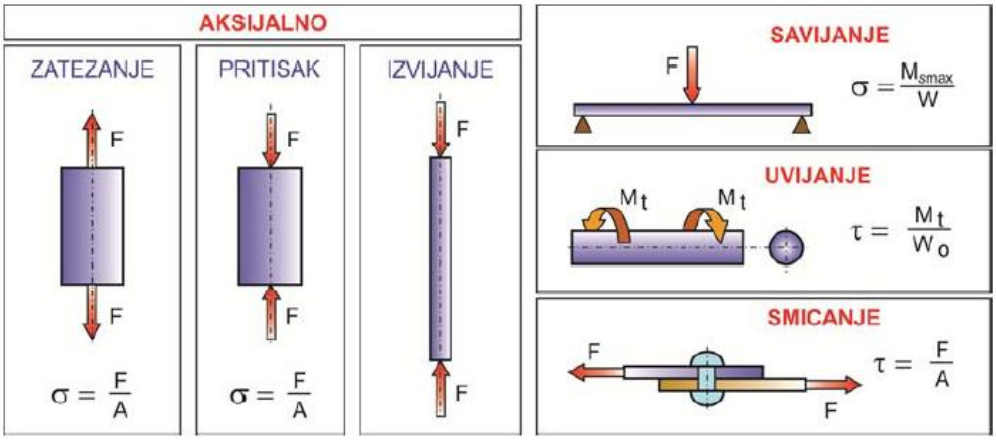
povećanjem tvrdoće dodirnih površina, što se kod čelika postiže termičkom i termo-hemijskom obradom površine (kaljenjem, cementacijom, nitriranjem, siliciranjem I sl.) ili nanošenjem tvrdih prevlaka (hrom, nikl, kobalt, volfram).

1.2.5. Mehaničke osobine

Osnovni uslov koji se nameće pri projektovanju, izradi i eksploataciji jedne inženjerske konstrukcije, jeste "*Kako uskladiti osobine materijala sa uslovima eksploatacije*". Pošto su mehanička opterećenja osnovni vid opterećenja kod najvećeg broja mašinskih konstrukcija, to je za racionalan izbor materijala poznavanje mehaničkih osobina izuzetno važno. Prema tome, mehaničke osobine materijala objašnjavaju povezanost između vanjskih opterećenja i njima izazvanih deformacija (Kudumović, 2010). Važne ***mehaničke osobine materijala*** su: čvrstoća, tvrdoća, žilavost, zamor i puzanje.

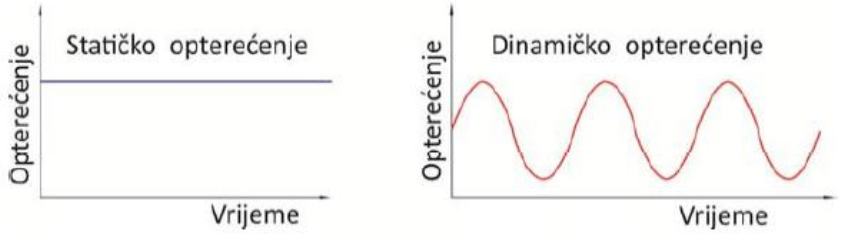
U zavisnosti od pravca djelovanja na radni predmet, vanjsko opterećenje može izazvati različita naprezanja, koja prema vrsti mogu biti (Slika 1.30):

- Aksijalna na zatezanje, pritisak ili izvijanje,
- Savijanje,
- Uvijanje i
- Smicanje.



Slika 1.30. Vrste opterećenja u zavisnosti od pravca djelovanja na radni predmet (Zrilić i Dobraš, 2018a)

Prema karakteru dejstva u toku vremena, opterećenja mogu biti statička i dinamička (Slika 1.31).



Slika 1.31. Vrste opterećenja prema karakteru djelovanja (Zrilić i Dobraš, 2018a)

U dinamička opterećenja se ubrajaju i udarna opterećenja koja podrazumijevaju opterećenja kod kojih dolazi do razmjene velikih količina energije u kratkom vremenskom intervalu.

Mašinski elementi u eksploataciji istovremeno su opterećeni sa više vrsta naprezanja (zatezanje - savijanje; torzija - savijanje i druge kombinacije). Pred projektantom je složen zadatak da uoči bitna ili iznađe rezultantna opterećenja i prema njima izvrši dimenzionisanje konstrukcije. Mašinske konstrukcije gotovo nikad nisu opterećene čisto statičkim opterećenjem. Prema dužini djelovanja mehanička opterećenja mogu biti kratkotrajna i dugotrajna. U realnim mašinskim konstrukcijama opterećenja su obično dugotrajna. Kratkotrajna opterećenja se uglavnom primjenjuju prilikom ispitivanja materijala.

Tabela 1.6. Podjela mehaničkih opterećenja

Djelovanje opterećenja prema			
Vrsti	Karakteru	Dužini	Temperaturnom nivou
Zatezanje	Statička	Dugotrajna	Sniženi
Pritisak	Dinamička	Kratkotrajna	Normalni
Smicanje	Udarno	Trenutna	Povišeni
Savijanje			
Uvijanje			
Izvijanje			

Svako opterećenje (sila) koje djeluje na neko tijelo nastoji u tijelu izazvati određene promjene.

Čvrstoća materijala je otpor kojim se materijal suprotstavlja razdvajanju kristalnih zrna.

Plastičnost materijala je sposobnost materijala da se trajno deformiše pod dejstvom operećenja ***Tvrdoća materijala*** je sposobnost materijala da se suprostavlja prodiranju drugog tvrđeg tijela u njegovu površinu pod dejstvom sile.

Mehanička ispitivanja daju podatke o čvrstoći, plastičnosti i tvrdoći materijala I ova ispitivanja su definisana standardima. Ispitivanja mehaničkih osobina mogu biti:

1. Ispitivanja sa razaranjem uzorka,
2. Ispitivanja bez razaranja uzorka,
3. Ispitivanja strukture metalografskim ispitivanjima.

Poznavanje metoda za ispitivanje mehaničkih osobina je neophodno da bi se mogla izvršiti kontrola prispjelih dijelova, da bi se prihvatili izvještaji periodične kontrole uređaja, izvještaj u slučaju havarije i sl. Kontrola se obavlja u licenciranim laboratorijama.

Čvrstoća materijala je otpornost materijala razaranju pod dejstvom spoljašnjih sila. U zavoisnosti od načina i vrste djelovanja sile razlikuju se sljedeće čvrstoće materijala:

- Zatezna čvrstoća,
- Čvrstoća na pritisak,
- Čvrstoća na savijanje,
- Čvrstoća na uvijanje.

1.2.5.1. Ispitivanje zatezanjem

Ispitivanje zatezanjem je najznačajniji način ispitivanja materijala u cilju određivanja mehaničkih osobina materijala, posebno osobina čvrstoće: napon tečenja Re i zatezna čvrstoća Rm. Istovremeno sa ispitivanjem osobina čvrstoće može se dobiti i mnogo drugih podataka, kao i podaci o mogućnosti plastičnog deformisanja materijala: izduženje A i suženje Z.

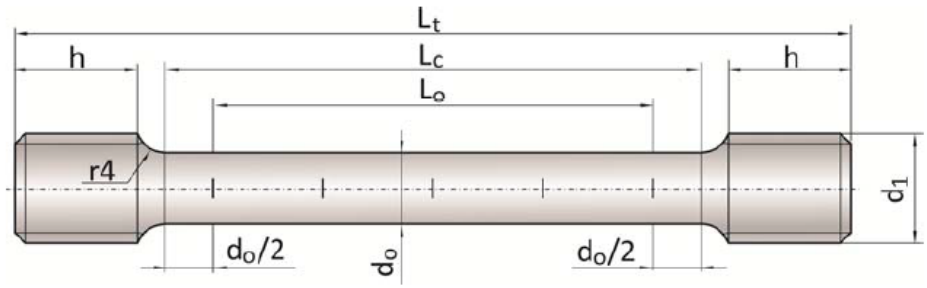
Za ispitivanje zatezanjem potrebno je izraditi epruvete prema određenim standardima. Oblik i dimenzije epruvete zavise od oblika i dimenzija metalnog proizvoda čije se mehaničke osobine ispituju. Proizvodi konstantnog poprečnog presjeka (profili, šipke, žice i drugo), mogu da se ispituju bez prethodne mašinske obrade.

Epruvete za ispitivanje zatezanjem mogu biti *tehničke* ili *standardne*.

Tehničke epruvete se ispituju u stanju u kojem se materijal koristi u praksi, bez prethodne posebne obrade. Ovaj pristup se primjenjuje na proizvode poput lanaca, čeličnih užadi, cijevi, profila, betonskog željeza, kao i na gotove mašinske dijelove.

Standardne epruvete, s druge strane, izrađuju se od pažljivo odabranih uzoraka materijala i mogu biti normalne ili proporcionalne, pri čemu obje varijante dolaze u kratkoj ili dugoj verziji. Njihove dimenzije i oblik strogo su regulisani odgovarajućim standardima, kako bi se osigurala tačnost i dosljednost ispitivanja.

Na Slici 1.32 su prikazane mjere standardne epruvete.



Slika 1.32. Mjere standardne epruvete

Mjere epruvete su:

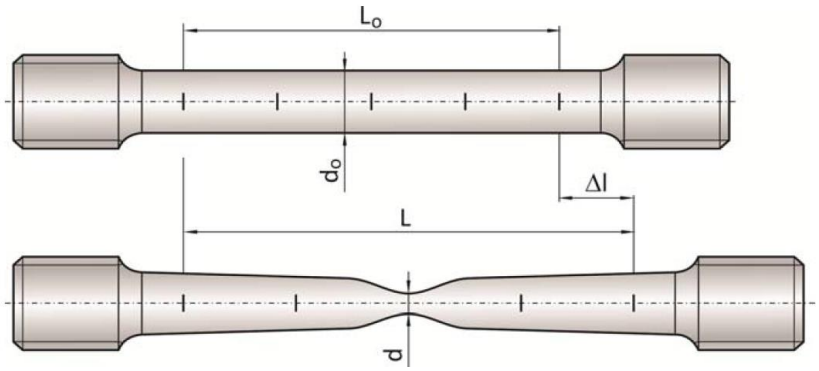
- do (mm) – početni prečnik mjerne dužine.
- Lo (mm) – početna dužina mjerne dužine.
- d1 (mm) – prečnik steznog dijela.
- h (mm) – dužina steznog dijela.
- Lt (mm) – ukupna dužina epruvete.
- LC (mm) – ukupna ispitna dužina epruvete, gdje je LC = Lo + do.
- So (mm²) – površina početnog presjeka mjerne dužine.

Pripremljena epruveta se podvrgava opterećenju zatezanjem koje može djelovati kratkotrajno ili dugotrajno, pri različitim temperaturnim nivoima pa se tako razlikuje sljedeće vrste ispitivanja zatezanjem:

- Ispitivanje zatezanjem kratkotrajnim rastućim opterećenjem, pri sobnim i povišenim temperaturama,
- Ispitivanje zatezanjem dugotrajnim konstantnim opterećenjem, najčešće pri povišenim temperaturama.

Ispitivanje kratkotrajnim rastućim opterećenjem se vrši na sobnim temperaturama između 10 i 35 ^{o}C, tako to se epruveta podvrgava zateznom opterećenju koje raste određenom brzinom, što zavisi od vrste ispitivanog materijala (od 0 – 30 N/mm^2 u sekundi). Ispitivanje se izvodi na kidalicama koje mogu biti horizontalne i vertikalne, na mehanički ili hidraulični pogon. Uz dodatnu opremu, na kidalicama se mogu vršiti i ispitivanja na pritisak, na savijanje ili dinamička ispitivanja.

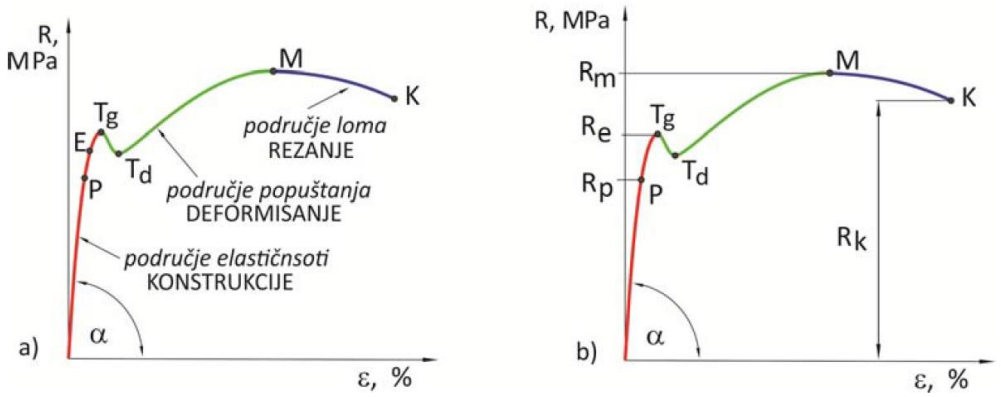
Na početku primjene sile zatezanja, epruveta se deformiše, pri čemu dolazi do njenog izduženja i istovremenog sužavanja poprečnog presjeka. Prije samog prekida epruvete, na njoj se formira "vrat". U ovom početnom stadijumu, deformacija je proporcionalna primijenjenoj sili, što znači da između sile i izduženja postoji linearna zavisnost (Slika 1.33).



Slika 1.33. Izduženje i suženje poprečnog presjeka epruvete pri ispitivanju zatezanjem

Stalnim mjerenjem trenutnog izduženja epruvete Δl, pri raznim vrijednostima opterećenja, dobijaju se dijagrami opterećenje – izduženje, koji služe za ocjenu određenih osobina ispitivanog materijala (Hukov dijagram) (Slika 1.34).

Na ordinatu se nanosi napon R = F/So, gdje je: F - sila koja djeluje okomito na poprečni presjek probnog uzorka, a So - prvobitni poprečni presjek probnog uzorka. Na apcisu se nanosi jedinično izduženje ε = ΔL/Lo, gdje je ΔL = L – Lo - trenutno izduženje, a Lo - početna mjerna dužina epruvete.



Slika 1.34. Hukov dijagram napon – jedinično izduženje (dilatacija) (Zrilić i Dobraš, 2018a)

Karakteristične tačke na dijagramu su: P – granica proporcionalnosti, E – granica elastičnosti,

T_g – gornja granica tečenja, T_d – donja granica tečenja, M – zatezna čvrstoća, K – čvrstoća pri lomu epruvete, α – ugao nagiba linearnog dijela dijagrama – modul elastičnosti.

Granični napon do kojeg je izduženje proporcionalno naponu naziva se ***granicom proporcionalnosti*,** tačka P na dijagramu. Ako se u području pravolinijskog porasta napona epruveta rastereti, nastala mala izduženja nestaju, a epruveta se vraća na svoju prvobitnu dužinu i oblik. Materijal se ponaša potpuno elastično i ovdje važi Hukov zakon.

Granica elastičnosti, tačka E, određuje se kao napon pri kojem ostaju trajne deformacije od 0,05% od početne dužine epruvete.

U području značajne deformacije (tečenja) materijala, uočava se maksimalna i minimalna vrijednost napona, odnosno ***gornja granica tečenja*** R_eH (u tački T_g) i ***donja granica tečenja*** R_eL (u tački T_d).

Na dijagramu napon - jedinično izduženje, do tačke (P) je elastično područije i tu je napon je proporcionalan deformaciji - prava linija. Tangens ugla α između duži OP i apscisne ose, definiše Jangov broj - ***modul elastičnosti*** *E* koji u fizičkom smislu predstavlja otpornost materijala prema deformaciji,

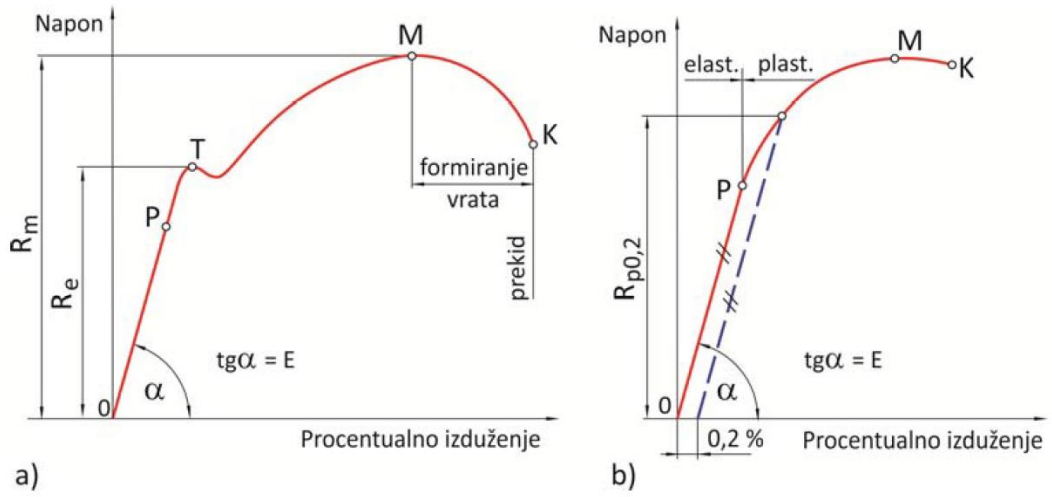
$$\operatorname{tg} \alpha = R_p / \varepsilon_p = E$$

Kod materijala koji imaju linearnu zavisnost između napona i deformacije, modul elastičnosti ima konstantnu vrijednost i zavisi od vrste materijala. Kod materijala koji ne pokazuju linearnu zavisnost između napona i deformacije, vrijednost modula elastičnosti se mijenja i zavisi od napona, Hukov dijagram se razlikuje za krte, čvrste i elastične materijale.

Tehnička granica tečenja (za materijale koji nemaju izraženu granicu tečenja) određena je naponom koji ostavlja trajnu - plastičnu deformaciju od 0,2% početne dužine probnog uzorka i naziva se ***konvencionalnim naponom tečenja*** $R_p0{,}2$ (Slika 1.35).

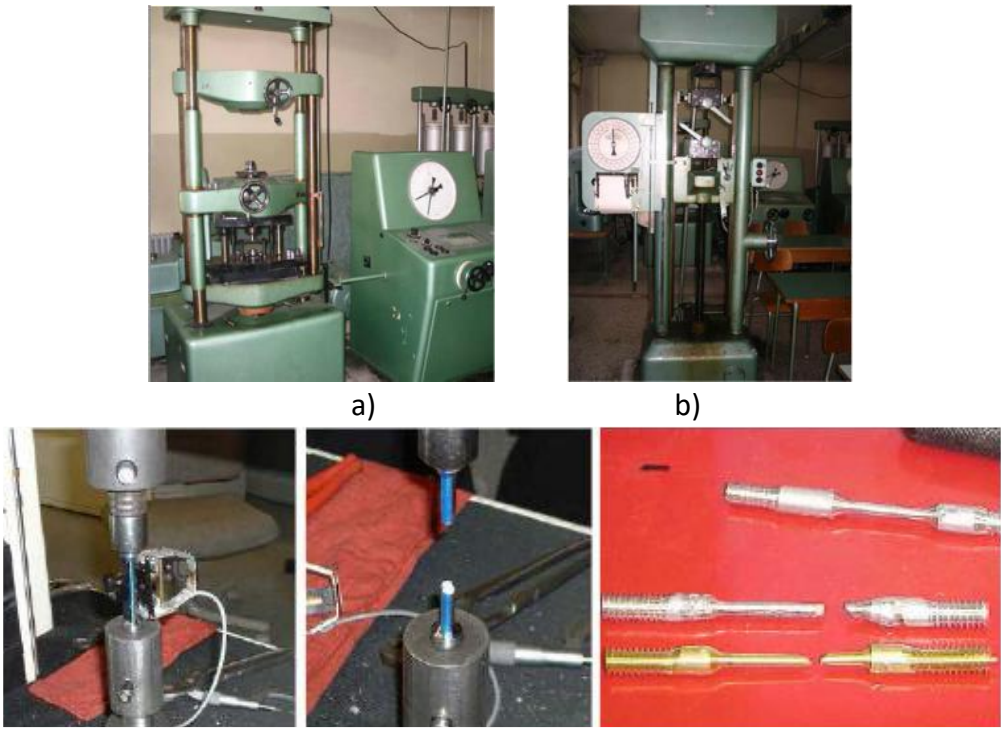
Daljim povećanjem napona, preko granice tečenja, dolazi do većih plastičnih deformacija, poprečni presjek se stalno i ravnomjerno smanjuje po cijeloj mjernoj dužini epruvete. Maksimalna vrijednost napona naziva se ***zatezna čvstoća*** R_m. To je napon koji odgovara maksimalnoj sili zatezanja duž ose epruvete koju epruveta može izdržati za vrijeme ispitivanja,

a da ne dođe do pojave pukotina ili loma. Napon pri kojem se epruveta kida naziva se ***napon kidanja*** R_k.



Slika 1.35. Hukov dijagram: a) za materijal koji ima granicu tečenja Re, b) za materijal koji ima tehničku granicu tečenja $R_p0,2$ (Zrilić i Dobraš, 2018a)

Pri proračunu metalne konstrukcije koristi sa ***dozvoljeni napon*** $\mathbf{R_{doz}}$ koji isključuje mogućnost pojave trajnih deformacija pri eksploataciji konstrukcija i računa se kao količnik napona na granici proporcionalnosti R_p i stepena sigurnosti v koji je uvijek veći od 1, ili u krajnjem slučaju jednak 1 kada je $R_{doz} = R_p$.

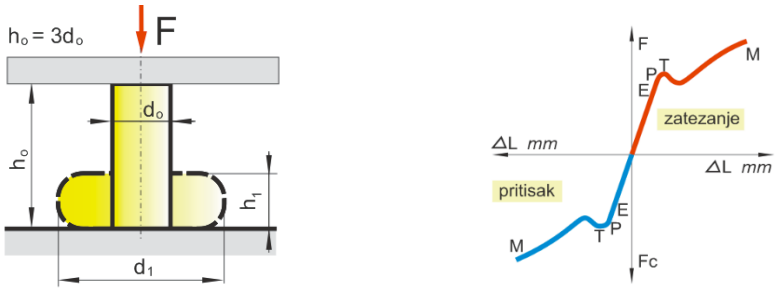


Slika 1.36. (a) Hidraulična kidalica; (b) Mehanička kidalica; (c) Izgled epruvete prije i poslije ispitivanja

1.2.5.2. *Ispitivanje pritiskom (sabijanjem)*

Tehnološka ispitivanja se izvode uglavnom u cilju utvrđivanja ponašanja ispitivanog materijala pri različitim vidovima obrade. To je, u stvari, utvrđivanje sposobnosti materijala za neku vrstu tehnološke prerade (Vitez et al., 2006).

Teorijski posmatrano sabijanje se može smatrati negativnim izduženjem (Slika 1.37).



E – granica elastičnosti P – granica proporcionalnosti T – granica tečenja M – maksimalna sila

Slika 1.37. Ispitivanje sabijanjem (lijevo), dijagram ispitivanja (desno)

Izduženje $A = \frac{l_1 - l_o}{l_o} \cdot 100\%$, odgovara skraćenju $A_C = \frac{h_o - h_1}{h_o} \cdot 100\%$, a kontrakcija $Z = \frac{A_o - A_1}{A_o} \cdot 100\%$ odgovara proširenju $Z_C = \frac{A_1 - A_o}{A_o} \cdot 100\%$.

Za ispitivanje metala sabijanjem karakteristično je sljedeće:

- Kod jako plastičnih metala ne dolazi do loma probe.
- Otpornost materijala zavisi od odnosa $h_o : d_o$.
- Na dobijene rezultate utiče trenje između dodirnih površina alata i probe.

Iz tog razloga su oblik i dimenzije ispitnih uzoraka standardizovane.

Kod sabijanja dolazi uglavnom do ispupčenja proba. Radi toga se čvrstoća na pritisak (R_{cm}) ne smije računati na početni presjek probe S_o , već se mora računati sa stvarnom površinom pod pritiskom S_{cm} kod preloma probe. Tu površinu moguće je izračunati na osnovu nepromjenjene zapremine:

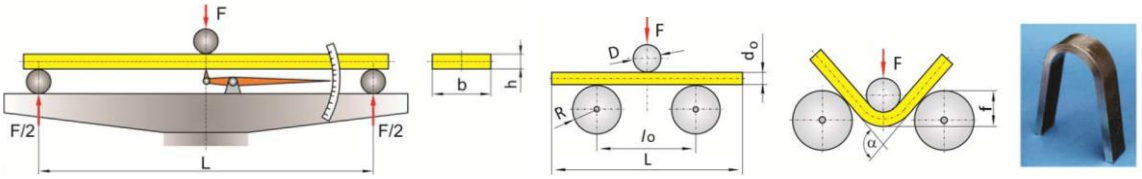
$$V = S_o \cdot h_o = S_{cm} \cdot h_{cm}\,, \quad \text{onda je:} \quad Scm = \frac{So \cdot ho}{h_1} \ mm^2$$

Stvarno naprezanje kod loma probe na sabijanja jednako je $Rcm = \frac{Fcm}{Scm}$ (N/mm^2)

1.2.5.3. *Ispitivanje na savijanje*

Ispitivanjem na savijanje mogu se dobiti podaci o čvrstoći i sposobnosti deformacije materijala. To ima naročite prednosti kod ispitivanja materijala sa malom plastičnošću, npr. kod sivog liva. Epruveta se savija na posebnom uređaju koji se sastoji iz dva međusobno paralelna oslonca poluprečnika R (na koje se postavlja epruveta) i valjka prečnika D (koji pritišće u sredini i s kojim se savija epruveta).

Rastojanje između oslonaca, ukoliko nije propisano u standardu proizvoda, treba da iznosi približno $D+3d_o$, gdje je d_o - debljina epruvete (Slika 1.38).



a) b)

Slika 1.38. Ispitivanje na savijanje krtih materijala (a), ispitivanje na savijanje deformabilnih materijala (b)

Čvrstoća savijanja (savojna čvrstoća) može se izračunati jednačinom: $R_s = 3FL/2bh^2$

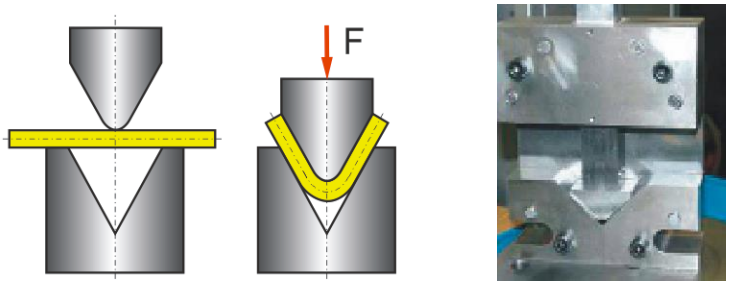
gdje je: F (N) - sila u trenutku loma, L (mm) - rastojanje između oslonaca, b (mm) - širina epruvete, h (mm) - visina epruvete.

Kod deformabilnih materijala, zavisno od metode ispitivanja na savijanje, mjeri se ugao savijanja i/ili dubina prodiranja žiga, sve do pojave prvih pukotina ili se posmatra površina ispitne epruvete nakon previjanja na ugao od 180°, (Slika 1.38).

Kod ispitivanja metala savijanjem, mjeri se pored opterećenja F i maksimalni ugib probe f. Čvrstoća savijanja može se izračunati formulom: $R_{SM} = \frac{F \cdot l_o}{4\,W}$ (N/mm^2)

W - moment otpora presjeka epruvete: $W = \frac{\pi \cdot d_o^3}{32}$ (cm^3)

Ispitivanje bakra i njegovih legura savijanjem vrši se na isti način kao i ispitivanje čelika, s tim da se ovdje za serijska ispitivanja koriste uređaji za savijanje u obliku V-bloka, (Slika 1.39).

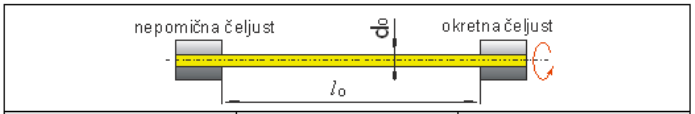


Slika 1.39. Ispitivanje na savijanje bakra u V bloku

1.2.5.4. Ispitivanje uvijanjem

Žice se često ispituju na uvijanje. Epruveta se isijeca iz nove žice ili niti metalnog užeta. Propisana dužina probe koja se ispituje i iznosi 200 do 50 x d . Komad žice određene dužine učvrsti se između dvije čeljusti (od kojih je jedna obrtna) i uvija oko svoje sopstvene ose, pri čemu ne smije doći do savijanja epruvete i promjene odstojanja između čeljusti mašine (Slika 1.40). Mjerilo vrijednosti je broj punih obrtaja oko ose, koje proba izdrži do prekida. Ispitivanje je zadovoljilo ako je postignut propisan broj uvijanja, bez obzira na mjesto prekida, suprotno proba ne zadovoljava ako prelom nastane prije propisanog broja uvijanja na rastojanju

manjem od 2d od ivice čeljusti. Brzina uvijanja ne dovodi do zagrijavanja žice, koje bi uticalo na broj uvijanja.



Nazivni prečnik d_o (mm)	Slobodna dužina žice l_o (mm)	Brzina uvijanja **v**, broj uvijanja/s
0,5 do 1,0	200 d_o	3
1,0 do 1,5	100 d_o	1,5
1,5 do 3,0		1
3,0 do 5,0		0,5
5,0 do 7,0	50 d_o	0,25

Slika 1.40. Ispitivanje žice uvijanjem.

1.2.5.5. Ispitivanje tvrdoće materijala

Tvrdoća predstavlja otpor kojim se jedno tijelo suprostavlja prodiranju drugog tvrđeg tijela u njegovu površinu (Prokić Cvetković i Popović, 2022). Mjerenjem tvrdoće može se vrlo brzo, jednostavno i bez razaranja materijala doći do podataka o njegovim osobinama. Ovo je i razlog što se metode za mjerenje tvrdoće široko primjenjuju pri kontroli kvaliteta materijala za dijelove mašinskih konstrukcija. Za mjerenje tvrdoće materijala koristi se više metoda koje se međusobno razlikuju po obliku i materijalu utiskivača, kao i po vrijednosti sile utiskivanja. S ozirom na vrstu opterećenja prilikom utiskivanja penetranta metode sedijele na ***statičke i dinamičke metode*** ispitivanja tvrdoće. Usvojena oznaka za tvrdoću je H. Statičke metode uključuju Brinelovu metodu (HB), Vikersovu metodu (HV) i Rokvelovu metodu (HR). S druge strane, dinamičke metode obuhvataju metodu Poldijevog čekića ili metodu upoređenja, skleroskopsku metodu i duroskopsku metodu.

Kod statičkih metoda mjerenja tvrdoće, rezultat se određuje na dva načina:

- Kao odnos primijenjene sile i površine otiska, ili
- Mjerenjem dubine otiska koji utiskivač ostavi u materijalu, izraženo u odgovarajućim jedinicama za tvrdoću.

Kod dinamičkih metoda tvrdoća se takođe može izraziti na dva načina:

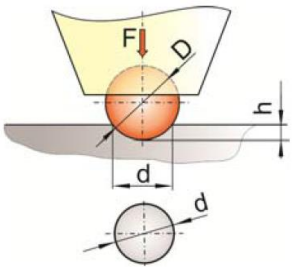
- Kao odnos sile i površine otiska kod pojedinih metoda, ili
- Kao bezdimenzionalni broj, izražen u jedinicama nazvanim prema izumitelju određene metode mjerenja tvrdoće.

Ispitivanje tvrdoće po **Brinelovoj metodi** primjenjuje se do vrijednosti tvrdoće HB = 450 kada se koristi čelična kuglica (HBS). Ukoliko se kao utiskivači koriste kuglice od tvrdih metala, ispitivanje se može obaviti do vrijednosti HB = 650 (označeno kao HBW) (Slika 1.41). Za vrijednosti tvrdoće iznad ovih granica dolazi do deformacija kuglice, što uzrokuje veće otiske i smanjuje izmjerenu tvrdoću.
Izmjerena brojčana vrijednost tvrdoće unosi se ispred oznake za tvrdoću, dok se iza nje navode uslovi ispitivanja prema sljedećem redoslijedu:

- Prečnik kuglice (izražen u milimetrima),
- Sila utiskivanja (izražena u danima),

- Vrijeme trajanja utiskivanja (izraženo u sekundama).

Primjer označavanja: 197 HBS2.5/187.5/15



Slika 1.41. Ispitivanje tvrdoće Brinelovom metodom

Kuglica se utiskuje u ispitivani materijal na dubinu "h" usljed čega na površini materijala ostaje otisak u obliku kalote prečnika "d" (Slika 1.41).

Sila utiskivanja određuje se korištenjem izraza F = C·D2, gdje je C konstanta koja zavisi od vrste ispitivanog materijala, a D prečnik kuglice:

- F = 294,2 D2 za tvrdi,
- F = 98,07 D2 za srednje tvrdi,
- F = 49,03 D2 za meki materijal.

Za određivanje tvrdoće potrebno je izmjeriti prečnik otiska d, i na osnovu njega, iz tabela očitati vrijednost tvrdoće ili izračunati na osnovu odnosa sile utiskivanja i površine otiska:

$$HB = \frac{0{,}204 \cdot F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

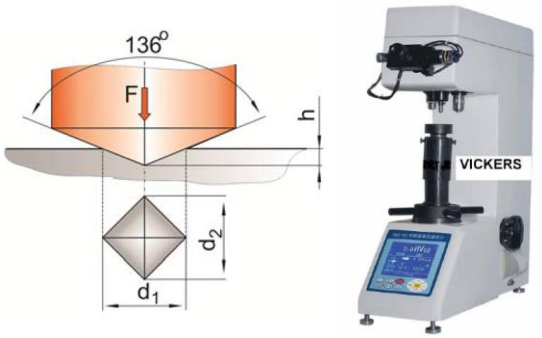
Mjerenje tvrdoće po Vikersovoj metodi omogućava ispitivanje tvrdoće svih metalnih materijala, bez ograničenja u pogledu raspona tvrdoće, od najmekših do najtvrđih materijala. Metoda se prilagođava veličini sile utiskivanja, a na osnovu toga se klasifikuje u sljedeće grupe:

a) Kada sila utiskivanja iznosi između 49 i 980 N: HV5, HV10, HV20, HV30, HV50 i HV100.
b) Kada sila utiskivanja iznosi između 1,96 i 49 N: HV0.2, HV0.3, HV0.5, HV1, HV2 i HV3.
c) Kod mjerenja mikrotvrdoće, gdje je sila utiskivanja manja od 1,96 N: HV0.15, HV0.1, HV0.05 i HV0.025.

Kao utiskivač se koristi dijamantska piramida sa kvadratnom osnovom I uglom na vrhu od 136°. Utiskivač (penetrator) se utiskuje u ispitivani materijal na dubinu "h", pri čemu na površini ostaje otisak u obliku četverostrane piramide sa dijagonalama baze "d1" i "d2", (Slika 1.42). Za određivanje tvrdoće potrebno je izmjeriti dijagonale otiska, izračunati njihovu srednju vrijednost i iz tabela pročitati vrijednost tvrdoće: $d = (d_1 + d_2)/2$. Tvrdoća po Vikersu određena je odnosom sile utiskivanja i površine otiska.

$$HV = \frac{1{,}584}{d^2}$$

Mjera tvrdoće po Vikersu izražava se u N/mm^2.



Slika 1.42. Mjerenje tvrdoće po Vikersu

Brojna vrijednost izmjerene tvrdoće se unosi ispred oznake za tvrdoću, a iza oznake, u indeksu, unose se uslovi mjerenja po redosljedu:

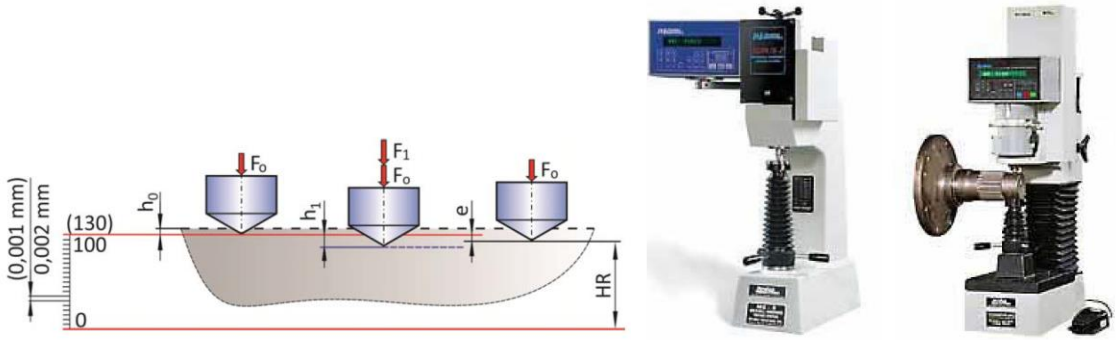
- Sila utiskivanja u dan i
- Vrijeme utiskivanja u sekundama.

Primjer oznake: 563 HV30/20

Za ispitivanje tvrdoće metala i legura po ***Rokvelovoj metodi*** kao utiskivač se koriste:

- Kuglica od kaljenog čelika prečnika D = 1/16'' (1,5875 mm) – HRB metoda,
- Dijamantski konus sa uglom na vrhu od 120° i zaobljenim vrhom sa poluprečnikom zaobljenja od 0,2 mm – HRC metoda.

Za razliku od Brinelove i Vikersove metode, po Rokvelovoj metodi tvrdoća se izražava kao dubina otiska (Slika 1.43). Mjerenje se izvodi u tri faze.



Slika 1.43. Ispitivanje tvrdoće po Rokvelovoj metodi

1. faza: Pripremljen uzorak postavi se na oslonac aparata za ispitivanje, utiskivač dovede u dodir sa površinom uzorka i optereti početnom silom F_o. Utiskivač prodire u površinu ispitivanog materijala do dubine h_o čime se uklanja uticaj neravnina površine na rezultat ispitivanja.

2. faza: Početnoj sili F_o se dodaje glavna sila utiskivanja F_1, tako da ukupna sila utiskivanja iznosi

$F_u = F_o + F_1$. Tada utiskivač prodire dublje u površinu ispitivanog uzorka do dubine h_1.

3. faza: Uklanja se opterećenje F_1, pa će utiskivač, zbog elastičnih deformacija ispitivanog materijala ostati na dubini označenoj sa „e“. To praktično znači da utiskivač prodre u površinu ispitivanog uzorka do nekog podjeljka na zamišljenoj skali ispod dubine h_o.

Uzeto je da ta skala ima 130 podjeljaka kada se kao utiskivač koristi kuglica iz tvrdog zakaljenog čelika, a 100 podjeljaka u slučaju kad se kao utiskivač koristi dijamantni konus. Razmak između dva podjeljka na pomenutim skalama iznosi 0,001 mm, odnosno 0,002 mm.

Prema tome, tvrdoća po Rokvelu, HR - je tvrdoća koja se izražava razlikom između uslovne dubine utiskivanja i dubine prodiranja utiskivača, nastale pod dejstvom glavnog opterećenja F_1, a poslije njegovog uklanjanja – pri zadržavanju početnog opterećenja F_o, a jednaka je:

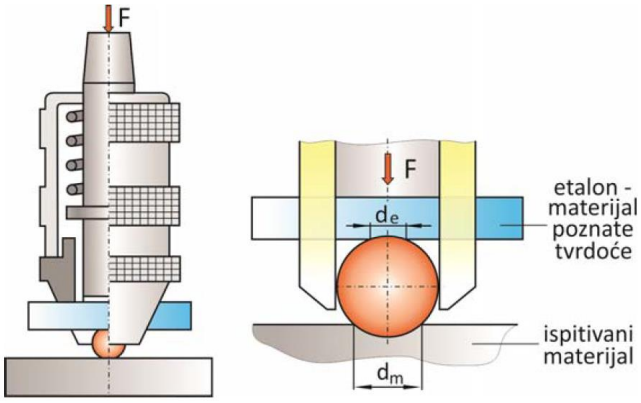
HRB = 130 – e, odnosno HRC = 100 – e.

Kao i kod statičkih metoda ispitivanja tvrdoće, postoji više ***dinamičkih metoda ispitivanja*** tvrdoće. Dinamičke metode se, pored međufazne kontrole, uglavnom koriste za mjerenje tvrdoće gotovih prizvoda i dijelova velikih dimenzija gdje nije moguće primijeniti druge metode mjerenja tvrdoće.

Ove metode mjerenja tvrdoće temelje se na dinamičkom djelovanju sile na utiskivač i elastično-udarnoj reakciji utiskivača od ispitivanog materijala. Odlikuju se jednostavnošću, brzinom, niskim troškovima i lakoćom primjene, iako uz nešto manju tačnost. Pogodne su za ispitivanje dijelova velike mase ili složene geometrije, kao i u slučajevima kada nije dozvoljena deformacija finalnih proizvoda, poput valjaka valjaonica, kovačkih batova, reznih alata i sličnih komponenti. Najčešće korišćene metode su Poldijeva, skleroskopska i duroskopska. Kako za metode dinamičkog ispitivanja tvrdoće ne postoje domaći standardi, primjenjuju se preporuke stranih standarda ili proizvođača opreme.

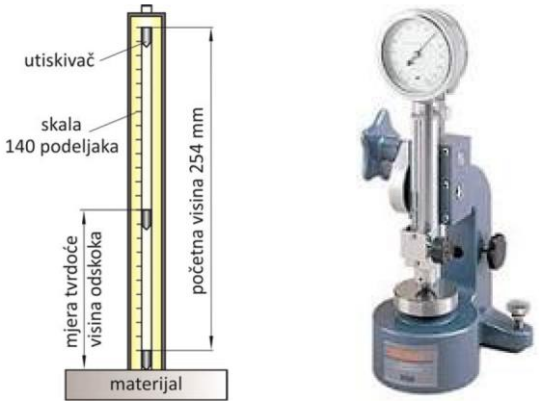
Poldijeva metoda tvrdoće koristi se kada nije moguće primijeniti statičke metode mjerenja, na primjer, zbog nedostatka opreme, velikih dimenzija ispitivanog dijela ili potrebe da se izbjegne razaranje uzorka. Ova metoda, iako manje precizna, daje rezultate koji su za praktične potrebe zadovoljavajući. Zasniva se na udarnom djelovanju utiskivača, omogućavajući određivanje tvrdoće na način sličan Brinel metodi. U suštini, Poldijeva metoda predstavlja modifikaciju Brinel metode, pri čemu se koristi kuglica od kaljenog čelika prečnika 10 mm.

Pod djelovanjem udara, kuglica ostavlja otisak u ispitivanom materijalu prečnika dm, dok istovremeno stvara otisak prečnika de u materijalu poznate tvrdoće (Slika 1.44). Na osnovu izmjerenih prečnika otisaka dm i de, tvrdoća ispitivanog materijala određuje se pomoću tabela koje prate aparat, prema vrijednostima tvrdoće po Brinelovoj metodi.



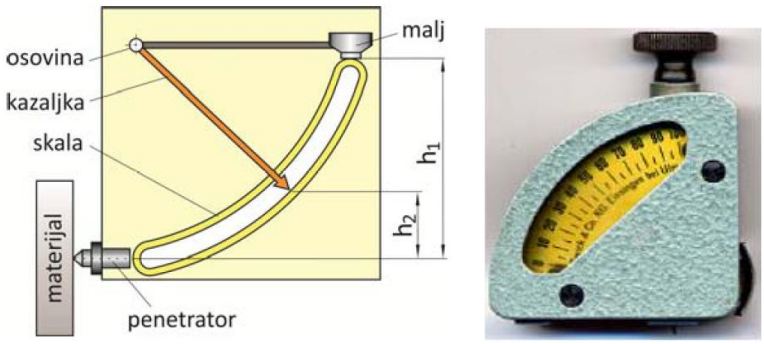
Slika 1.44. Ispitivanje tvrdoće Poldijevom metodom (Zrilić i Dobraš, 2018a)

Skleroskopska metoda (Shore metoda) za mjerenje tvrdoće (HSh) zasniva se na elastičnom odskoku utiskivača i vizuelnom određivanju visine njegovog prvog odskoka. Visina odskoka zavisi od svojstava materijala, poput tvrdoće, modula elastičnosti, stanja površine, mase ispitivanog predmeta i karakteristika mjernog aparata. Aparat je jednostavne konstrukcije i sastoji se od staklene cijevi dužine 254 mm, podijeljene na 140 podeoka. Unutar cijevi se nalazi pokretni utiskivač mase 2,5 g, opremljen dijamantskim vrhom u obliku konusa. Tokom ispitivanja, utiskivač se slobodno pušta da pada kroz staklenu cijev bez trenja, direktno na površinu ispitivanog materijala. Visina prvog odskoka utiskivača, izražena u podeocima skale, predstavlja mjeru odskočne tvrdoće materijala (Slika 1.45).



Slika 1.45. Skleroskopska metoda mjerenja tvrdoće

Duroskopska metoda (HD) koristi duroskop, poznat i kao sklerograf, koji je jednostavan, lagan aparat malih dimenzija, posebno pogodan za brzo mjerenje tvrdoće, uključujući tvrdoću vertikalnih površina. Princip rada temelji se na padu malog malja (bata), koji se rotira oko osovine i pada s početne visine h_1 na penetrator naslonjen na površinu ispitivanog materijala. Kinetička energija malja troši se na utiskivanje penetratora, pri čemu dolazi do kombinacije plastičnih i elastičnih deformacija materijala. Zbog elastičnog povratka, malj se odbija i podiže do određene visine h_2. Ova visina odskoka, koja zavisi od elastičnih osobina materijala, bilježi se pomoću kazaljke koju malj pomiče tokom odskoka. Položaj kazaljke očitava se na skali durometra i predstavlja mjeru tvrdoće prema ovoj metodi (Slika 1.46).



Slika 1.46. Duroskop

Literatura:

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: an introduction. John wiley & sons 975p.

Gabrić, I., & Šitić, S. (2012). Materijali I. Sveučilište u Splitu. Sveučilišni odjel za stručne studije. Studij: konstrukcijsko strojarstvo. Split.

Globočki-Lakić, G. (2023). Mehanizacija u šumarstvu: Separati predavanja i vježbi u elektronskoj formi. Banja Luka: Šumarski fakultet.

Jamnicki, S. (2024). Polimerni materijali. Preuzeto sa interneta, 8.2.2024.

Kudumović, Dž. (2010). Materijali II. Tuzla: Mašinski fakultet 262str.

Macan, J. (2024). Kompozitni materijali. Preuzeto sa interneta, 8.2.2024.

Prokić Cvetković, R., & Popović, O. (2022). Mašinski materijali I (3. izdanje). Beograd: Mašinski fakultet. 181 str

Vitez, I., Oruč, M., & Sunulahpašić, R. (2006). Ispitivanje metalnih materijala – mehanička i tehnološka ispitivanja. Univerzitet u Zenici Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica.

Zrilić, R., & Dobraš, D. (2018a). Nauka o materijalima (Knjiga 1). Banja Luka: Mašinski fakultet.

Zrilić, R., & Dobraš, D. (2018b). Nauka o materijalima (Knjiga 2). Banja Luka: Mašinski fakultet.

2. MAŠINSKI ELEMENTI

Mašinski elementi predstavljaju dijelove mašina sličnog oblika, koji se međusobno povezuju kako bi formirali podsklopove i sklopove. Njihovim spajanjem nastaju složenije cjeline, poput mašina ili konstrukcija. Ovi osnovni sastavni dijelovi mašina standardizovani su prema konstrukciji, dimenzijama i vrsti materijala. Većina njih proizvodi se serijski u specijalizovanim fabrikama, uključujući vijke, ležajeve, kaiševe, lance, spojnice i slične komponente. Postoje i mašinski elementi koji se ne proizvode serijski, ali su njihovi parametri definisani standardima, pa se prema tim smjernicama proizvode, kao što su zupčanici, lančanici i kaišnici (Gligorić, 2020).

Mašinski elementi klasifikuju se u nekoliko glavnih grupa i podgrupa:

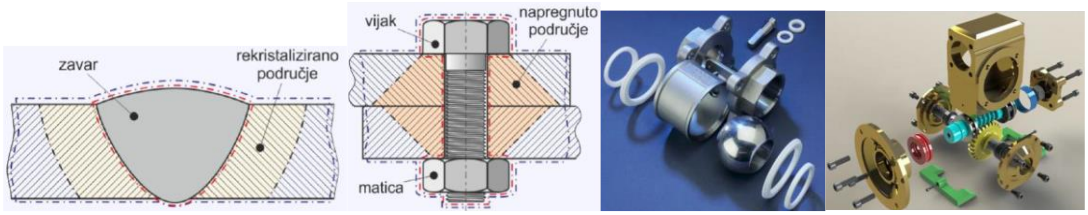
1. Elementi za vezu:
   - Za razdvojivu vezu: zavrtnji, klinovi, opruge i ožljebljeni spojevi.
   - Za nerazdvojivu vezu: zakovice, zavareni spojevi, lemljeni i ljepljeni spojevi, kao i presovani spojevi.
   - Za osiguranje spojeva: uskočnici, rascjepke, podmetači i slični elementi.
2. Elementi za prenos snage: zupčasti, lančani, kaišni i frikcioni prenosnici.
3. Elementi obrtnog kretanja: osovine, vratila i osovinice.
4. Elementi za oslanjanje i spajanje: ležaji, ležišta, kućišta i spojnice.
5. Elementi za provođenje fluida: cijevi, zatvarači, slavine, ventili i slični dijelovi.



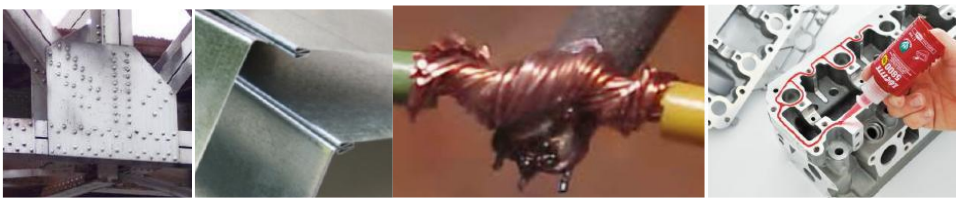
Slika 2.1. Različiti mašinski elementi (Gligorić, 2020)

Mašinski elementi se u osnovi dijele na dvije osnovne grupe:

- Opštu grupu kojoj pripadaju: klinovi, navojni spojevi, zakovice, opruge, cijevi i cijevni zatvarači, osovine, vratila, ležišta i ležajevi, spojnice, frikcioni, zupčasti i lančani prenosnici snage,
- Posebnu grupu koju čine: klipovi sus motora, bregasta vratila itd.



a) b) c) d)



e) f) g) h)

Slika 2.2. Neki mašinski elementi opšte grupe: a) zavareni spoj, b) vijčana veza, c) kuglasti ventil, d) pužni prenosnik, e) zakovični spoj, f) spoj savijanjem, g) lemljeni spoj, h) lijepljeni spoj

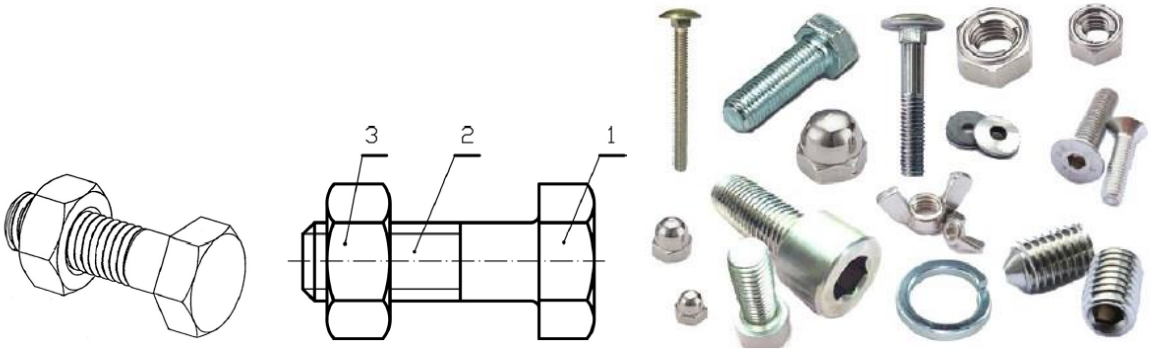
2.1. Mašinski elementi za vezu

2.1.1. Mašinski elementi za razdvojivu vezu

U ovu grupu mašinskih elemenata se ubrajaju: vijci (zavrtnji), klinovi, opruge i ožljebljeni spojevi.

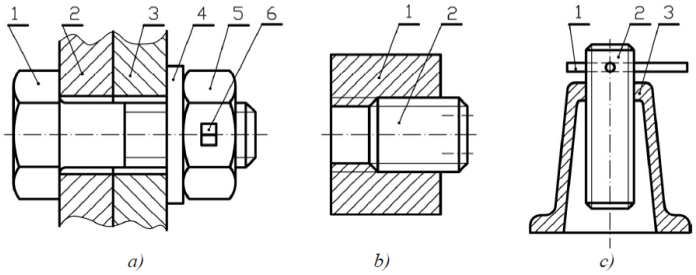
2.1.1.1. Vijci (zavrtnji)

Mašinski elementi koji omogućavaju razdvojivo spajanje dijelova mašina nalaze široku primjenu u svim vrstama mašina i konstrukcija. Karakterišu ih različiti konstrukcioni oblici, prilagođeni specifičnim primjenama. Vijak obično ima tri osnovna dijela: glavu (pozicija 1), stablo sa zavojnicom (2) i navrtku (3) koja sadrži otvor sa zavojnicom (Slika 2.3). U unutrašnjosti navrtke nalazi se zavojnica koja odgovara onoj na stablu vijka. Ključni element svake vijčane veze je žlijeb u obliku zavojnice, koji omogućava čvrsto spajanje i otpornost na opterećenja.



Slika 2.3. Vijak sa navrtkom (1 - glava vijka, 2 - stablo vijka sa zavojnicom, 3 - navrtka)

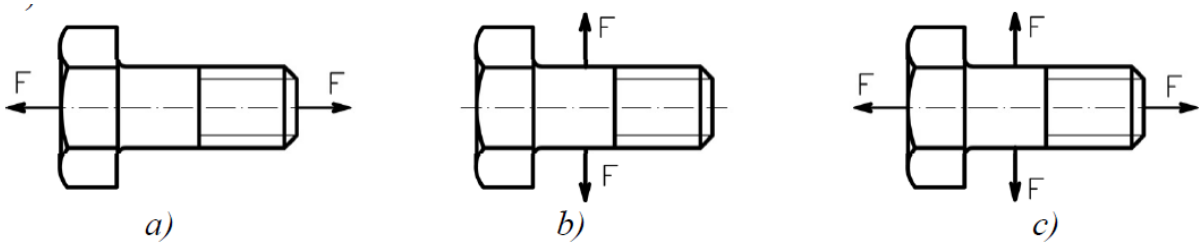
Vijčane veze se dijele na nepokretne i pokretne. Nepokretne su one koje se ne obrću pod opterećenjem (Slika 2.4.a i b), a pokretne koje se obrću pod opterećenjem (Slika 2.4.c).



Slika 2.4. Pokretne a) i b) i nepokretne c) vijčane veze

Nepokretna vijčana veza obično se sastoji od nekoliko elemenata: vijka (1) sa stabljikom i zavojnicom, spajanih dijelova (2 i 3), podloške (4), navrtke (5) i osigurača protiv samoodvrtanja (6). Podloška ima ključnu ulogu jer povećava površinu dodira između navrtke i spojnog dijela, omogućavajući vijčanom spoju da podnese veća opterećenja, čime se smanjuje vjerovatnoća samoodvrtanja. Posebna pažnja posvećuje se zaštiti vijčanih spojeva od samoodvrtanja u radnim uslovima s izraženim vibracijama ili promjenljivim opterećenjima, zbog čega se koristi osigurač. Pritezanjem navrtke povećava se trenje na dodirnim površinama, koje nosi spoljašnje opterećenje. Ovo opterećenje može biti: aksijalno (sila djeluje paralelno s dužom simetralnom osom vijka), radijalno (sila djeluje upravno na ovu osu) ili kombinovano (Gligorić, 2020).

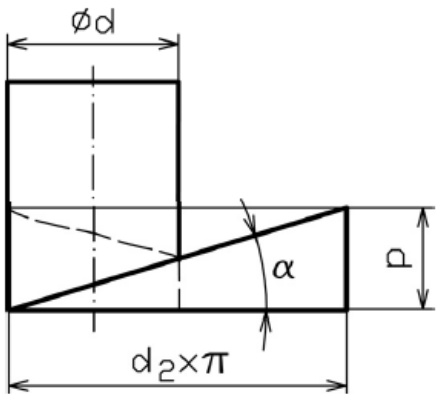
Vijci mogu biti opterećeni uzdužno, poprečno i složeno. Kod uzdužno opterećenih javlja se istezanje ili sabijanje stabla vijka (Slika 2.5a), poprečno opterećeni su oni zavrtnji kod kojih se javlja naprezanje na smicanje ili savijanje stabla zavrtnja (Slika 2.5b), a složeno naprezanje prikazano je na (Slici 2.5c).



Slika 2.5. Vidovi opterećenja vijčane veze

Osnovni parametri zavojnice

Vitalni dio na vijku je zavojnica koja nastaje kada se pravougli trougao obrće oko valjka nominalnog prečnika *Ø d,* (Slika 2.6.). Dužina veće katete trougla jednaka je obimu valjka d_2 x π, a dužina manje katete je korak *p.*



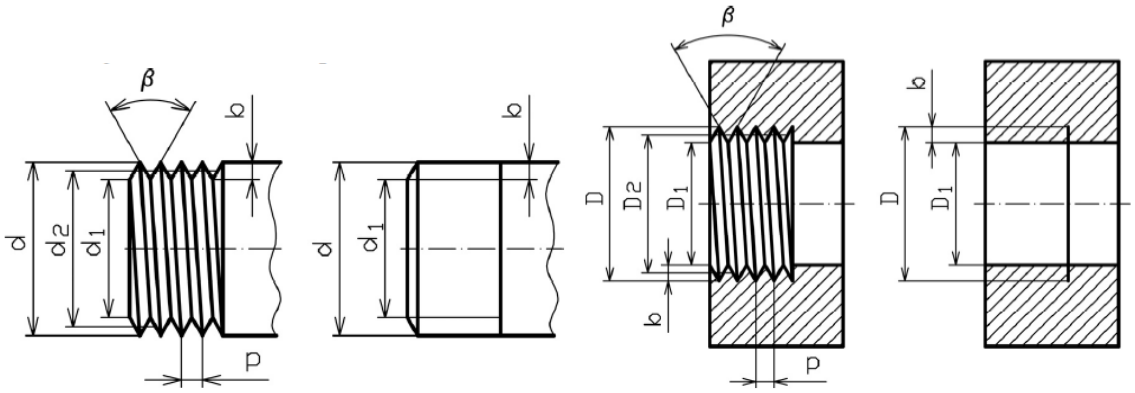
Slika 2.6. Nastanak zavojnice

Osnovni parametri zavojnice na stablu i u rupi su (Slika 2.7):

d , D -nominalni prečnici, *d1 , D1* -prečnici jezgra, *d2 , D2* -srednji prečnici, *b* -dubine zavojnica, β-uglovi profila zavojnica, α-uglovi nagiba zavojnica i *p* -koraci zavojnica.
Ugao nagiba zavojnice određuje se na osnovu izraza:

$$tg\varphi = \frac{p}{d_2 \cdot \pi} = \frac{p}{D_2 \cdot \pi}$$

Dimenzije zavojnice na stablu i u rupi moraju biti identične, uz poštovanje odgovarajućih tolerancija, kako bi se omogućila pravilna montaža. Ovo podrazumijeva jednakost sljedećih parametara: d = D, $d_1 = D_1$, $d_2 = D_2$, dubina zavojnice b, uglovi profila zavojnice β, uglovi nagiba zavojnice α, kao i koraci p.



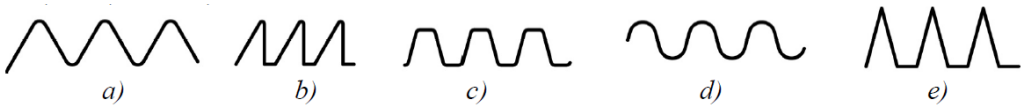
a) b)

Slika 2.7. Parametri zavojnice: a) na stablu, b) u rupi

Vrste zavojnica

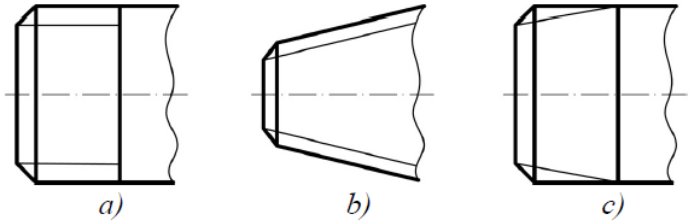
Profil zavojnice najčešće ima oblik jednakokrakog trougla (Slika 2.8), ali može biti i drugih oblika, poput pravouglih trouglova (b), trapeza (c), dijelova kružnice (d) ili jednakokrakog trougla s razmaknutim profilom (e). Vrhovi i podnožja svih ovih profila su zaobljeni.

U zavisnosti od oblika profila i odnosa osnovnih parametara, razlikuju se sljedeće vrste zavojnica: metrička, vitvortova, testerasta, trapezna, obla, kao i zavojnice za drvo, lim i druge specifične primjene. Zavojnice mogu biti izvedene kao desne ili lijeve (Gligorić, 2020).



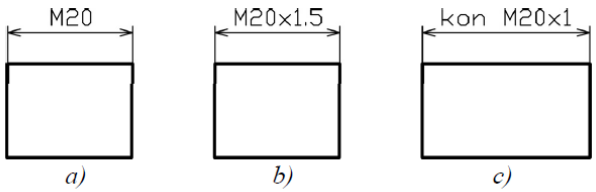
Slika 2.8. Različiti profili zavojnica

Zavojnica može biti jednohoda, dvohoda i višehoda. Uglavnom se koristi jednohoda zavojnica, a za vretena presa i vretena mašina alatki koristi se višehoda. Zavojnica može biti narezana na cilindričnom stablu (Slika 2.9), na koničnom stablu, a može biti i konična zavojnica na cilindričnom stablu. Uglavnom se koristi zavojnica na cilindričnom stablu, dok se za cijevi može koristiti konična zavojnica na cilindričnom stablu (Gligorić, 2020). Zavisno od oblika profila zavojnice i od uzajamnog odnosa vrijednosti parametara, zavojnice se dijele na: metričke, vitvortove, trapazne, kose, oble, zavojnice za lim i drvo itd.



Slika 2.9. Zavojnica na: cilindričnom stablu a), na koničnom stablu b) i konična zavojnica na cilindričnom stablu c)

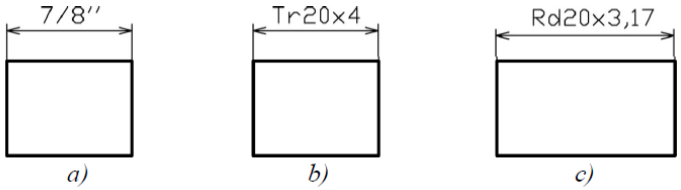
Metrička zavojnica ima profil u obliku jednakokrakog trougla sa uglom profila β = 60°, a sve dimenzije izražene su u milimetrima. Ova vrsta zavojnice ima široku univerzalnu primjenu. Zavojnice mogu biti izvedene s krupnim korakom, sitnim korakom ili kao cjevne. Oznaka metričke zavojnice započinje slovom M, ispred vrijednosti nominalnog prečnika. Na primjer, za zavojnicu s krupnim korakom (Slika 2.10a), oznaka je M20, pri čemu se korak od 2,5 mm ne navodi. Kod zavojnica sa sitnim korakom, korak se dodatno označava, npr. M20x1,5, gdje je korak p = 1,5 mm (Slika 2.10b). Metrička cjevna zavojnica, koja je cilindrična na stablu, dok je sama zavojnica konusna, označava se npr. kao kon M20x1 (Slika 2.10c). Dimenzije metričkih zavojnica standardizovane su prema važećim standardima.



Slika 2.10. Označavanje metričke zavojnice

Vitvortova zavojnica ima profil u obliku jednakokrakog trougla, sličan metričkoj zavojnici, ali sa uglom profila β = 55° (Slika 2.11a). Dimenzije ove zavojnice izražavaju se u colima, pri čemu je 1" = 25,4 mm. Vitvortova zavojnica može imati krupni ili sitni korak, a takođe se koristi i kao cjevna zavojnica. Iako je Vitvortova zavojnica sve više potisnuta metričkom zavojnicom, i dalje nalazi primjenu na vodovodnim i kanalizacionim cijevima zbog svojih dobrih zaptivnih svojstava. Oznaka ove zavojnice uključuje vrijednost nominalnog prečnika izraženu u colima, na primjer, 7/8".

Trapezna zavojnica ima profil trapeza sa uglom profila β=*30*°, (Slika 2.11b). Koristi se za vijčane veze koje se zavrću ili odvrću pod opterećenjem, jer ima najveći stepen korisnosti (najlakše se zavrće pod opterećenjem). Primjenjuje se za vretena dizalica, presa, i sl. Oznaka se sastoji iz slova Tr, prečnika i koraka, npr. Tr20x4, gdje je *d=20 mm,* a *p=4 mm* .



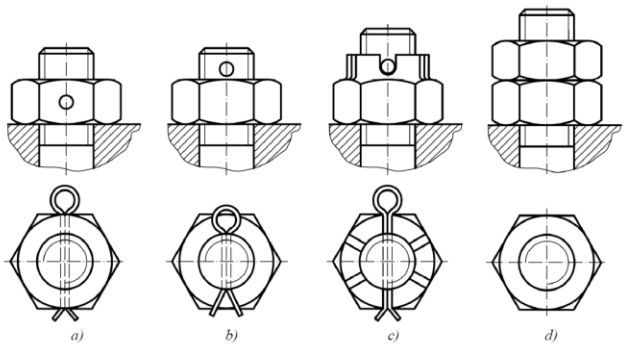
Slika 2.11. Označavanje Vitvortove a), Trapezne b), i oble zavojnice c)

Obla zavojnica ima profil jednakokrakih trouglova, zaobljenih pri vrhu i podnožju toliko da se dobiju dijelovi kružnica. Koristi se za spojeve koji treba brzo da se uvrnu i odvrnu (vatrogasne cijevi). Obla zavojnica označava se slovom Rd, prečnikom i korakom, npr. *Rd20x3,17*, gdje je *d=20 mm*, a*p=3,17 mm* (Slika 2.11c) (Gligorić, 2020).

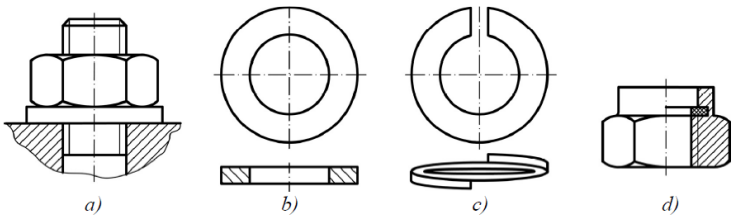
Materijali za vijke i navrtke

Izrada zavojnice može se vršiti različitim metodama, uključujući rad na mašinama alatkama, ručnu izradu pomoću nareznica, kao i hladno valjanje. Zavojnice se izrađuju na strugovima, glodalicama, brusilicama i sličnim mašinama. Pri ručnoj izradi koriste se nareznice za stabla i ureznici za rupe, koji imaju profil i dimenzije odgovarajuće zavojnice. Hladno valjanje, koje se izvodi pomoću valjaka ili ploča, predstavlja izuzetno efikasnu i ekonomičnu metodu koja omogućava visok kvalitet zavojnica.

Vijci se najčešće izrađuju od čelika, ali se mogu koristiti i drugi materijali. Standardi ne definišu konkretne vrste materijala za vijke, već propisuju njihove mehaničke karakteristike. Standardne oznake materijala za vijke su: 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.6, 6.8, 6.9, 8.8, 10.9, 12.9 i 14.9, dok su za navrtke predviđene oznake: 4, 5, 6, 8, 10, 12 i 14. Glavni nedostatak vijčanih spojeva je njihova sklonost ka samoodvrtanju, posebno u spojevima izloženim vibracijama. Zbog toga se vijčani spojevi osiguravaju različitim metodama, poput upotrebe rascjepki (Slika 2.12), dvostrukih navrtki, podložaka i sličnih elemenata. Za sprečavanje samoodvrtanja koriste se obični podlošci, elastični podlošci i elastični prstenovi (Slika 2.13).

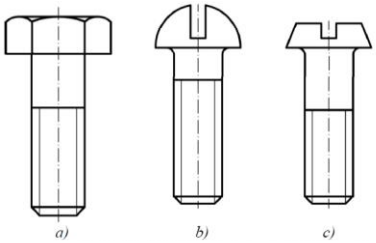


Slika 2.12. Različiti načini osiguranja vijčane veze od samoodvrtanja: a) rascjepkom kroz navrtku i stablo, b) rascjepkom kroz stablo, c) krunastom navrtkom i rascjepkom, d) sa dvije navrtke (Gligorić, 2020)



Slika 2.13. Osiguranje od samoodvrtanja: a) navrtka sa podloškom, b) obična podloška, c) elastična podloška, d) elastični prsten

Konstrukcioni oblici i dimenzije vijka i navrtke definisane su međunarodnim i nacionalnim standardima a kako bi se prilagodili potrebama ugradnje vijci mogu biti vrlo različitih standardnih konstrukcionih oblika (Slika 2.14).

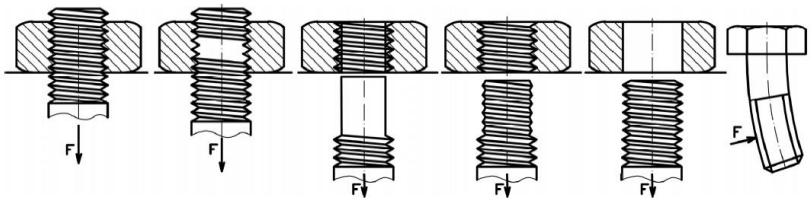


Slika 2.14. Konstrukcioni oblici vijaka: a) sa šestougaonom glavom - najčešći oblik, b) sa poluloptastom glavom, c) sa valjkastom koničnom glavom

Pravilno korišćenje i održavanje vijčanih veza sastoji se u sljedećem:

- Primjeni bez preopterećenja,
- Kontroli pritegnutosti i
- Zaštiti od korozije.

Preopterećenje vijčane veze može da bude već pri samom pritezanju, dok još ne djeluje radna sila i tada dolazi do trajnih deformacija zavojaka u rupi i na stablu vijka i dolazi do deformacije stabla vijka (Slika 2.15). Deformisan vijak treba zamijeniti novim, istih dimenzija, iste zavojnice i od istog materijala.



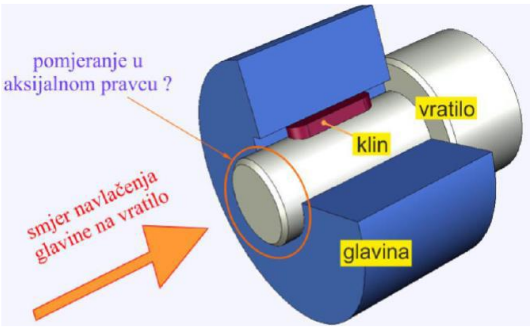
Slika 2.15. Deformacije na vijku usljed preopterećenja

2.1.1.2. Klinovi

Klinovi su mašinski elementi koji služe za spajanje vratila i osovina sa prenosnicima snage i drugih mašinskih dijelova koji se nalaze na vratilima i osovinama (točkovi, doboši, rotori i sl.). Klinovi se dijele na: uzdužne, poprečne i čivije – koji su poseban oblik poprečnih klinova.

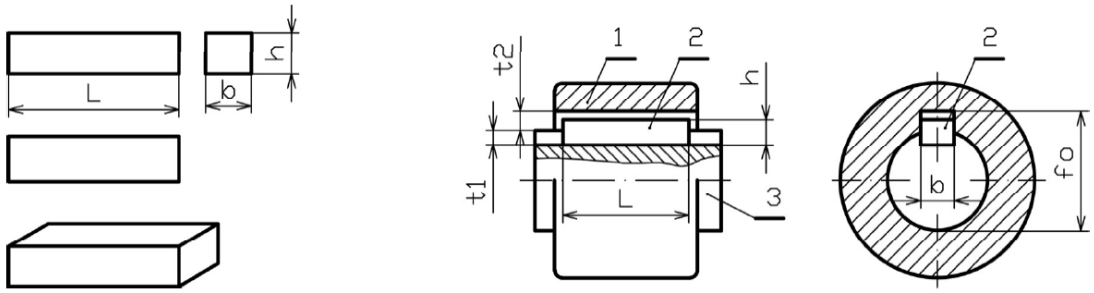
Uzdužni klinovi su opterećeni uzduž svoje ose simetrale i mogu biti: bez nagiba i sa nagibom. Klinovi bez nagiba se koriste za vratila čiji su ležaji osjetljivi na udare i kada se prenosnici često pomjeraju po vratilu. Klinovi sa nagibom se koriste za ležaje koji nisu osetljivi na udare i za prenosnike koji se ne pomjeraju uzduž vratila.

Prema konstrukcionom izgledu, uzdužni klinovi dijele se na: normalne, klinove sa kukom, segmentne, tangentne, tetivne, itd. Spojeve s klinovima treba osigurati od aksijalnog pomicanja u smjeru suprotnom od smjera navlačenja (Slika 2.16).



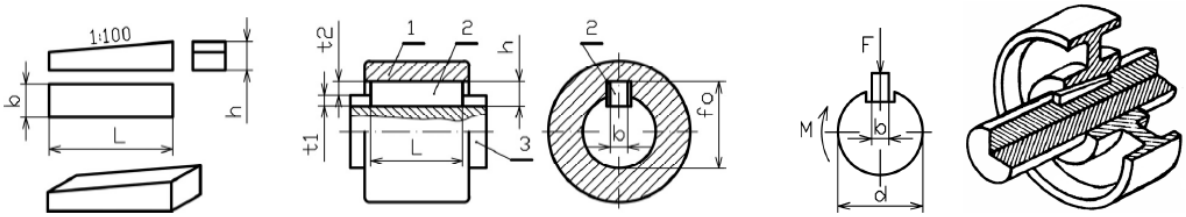
Slika 2.16. Klin se mora osigurati od aksijalnog pomjeranja

Normalni klin ima oblik prizme sa ravnim ili polukružnim krajevima. Mogu biti sa i bez nagiba. Osnovni parametri ***normalnog klina bez nagiba*** sa ravnim završecima su: širina *b*, visina *h* i dužina *L*. Vrijednosti ovih parametara definisane su nacionalnim i međunarodnim standardima (Slika 2.17).



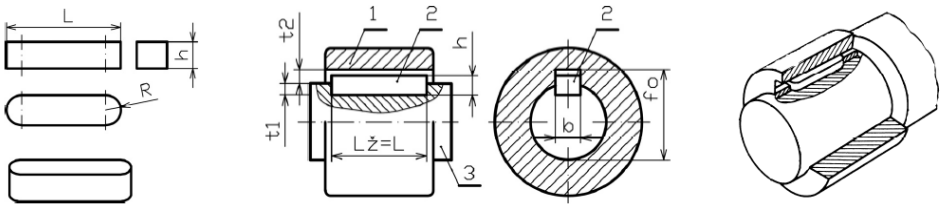
Slika 2.17. Normalni kiln bez nagiba: 1-glavčina, 2-klin, 3- vratilo

Normalni klin sa ravnim završecima prenosi obrtni moment M trenjem koje nastaje između gornje i donje površine klina pod djelovanjem sile F, dok bočne strane klina nisu u kontaktu (Slika 2.18). Tokom prenosa obrtnog momenta, gornja površina klina je izložena površinskom pritisku. Ova vrsta klina primjenjuje se kada prenosnik ostaje fiksiran na vratilu, bez mogućnosti pomjeranja. Žljeb za smještaj klina na vratilu treba da bude dva do tri puta duži od dužine klina L, kako bi se omogućila pravilna montaža.



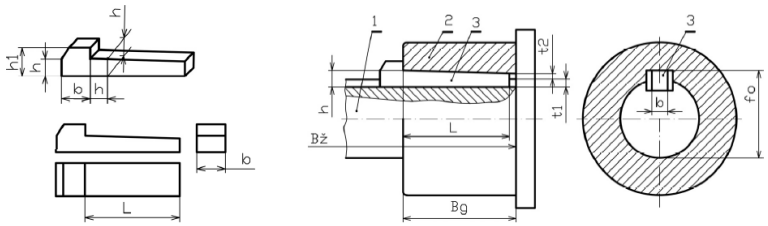
Slika 2.18. Normalni klin sa nagibom: 1-glavčina, 2-klin, 3- vratilo (Gligorić, 2020)

U praksi se često koristi i klin sa zaobljenim krajevima, koji može imati nagib ili biti bez nagiba. Ovaj tip klina zahtijeva žljeb na vratilu koji odgovara njegovoj dužini i obliku, tako da je Lž = L (Slika 2.19). Tokom montaže, klin (2) se prvo postavlja u žljeb vratila (3), a zatim se glavčina (1) navlači preko vratila i klina. Ovaj tip klina primjenjuje se u situacijama gdje nije moguće pristupiti prenosniku sa obje strane.

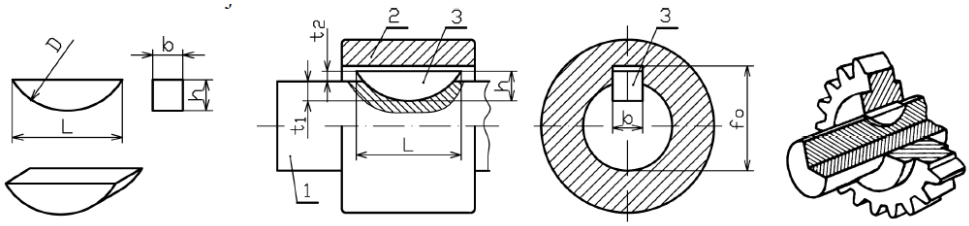


Slika 2.19. Klin bez nagiba sa zaobljenim krajevima (Gligorić, 2020)

U praksi se koriste i sljedeći klinovi: klin sa kukom (Slika 2.20), zaobljeni klin, tetivni klin, tangentni klin, segmentni klin (Slika 2.21). Segmentni kiln sa jedne strane ima oblik kružnice, a sa druge strane je ravan. Žljeb u vratilu je istog takvog kružnog oblika. Ovaj klin omogućava lako pomjeranje prenosnika po vratilu. Koristi se u mjenjačima, na mašinama alatkama itd. Nedostatak segmentnog klina je taj što mu je potreban dubok žljeb u vratilu, te je na tom mjestu vratilo oslabljeno.

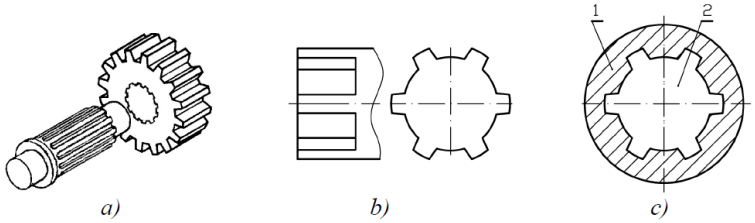


Slika 2.20. Klin sa kukom, koristi se kada je pristupačna samo jedna strana prenosnika, (Gligorić, 2020)



Slika 2.21. Segmentni klin, 1-vratilo, 2-glavčina, 3-klin, (Gligorić, 2020)

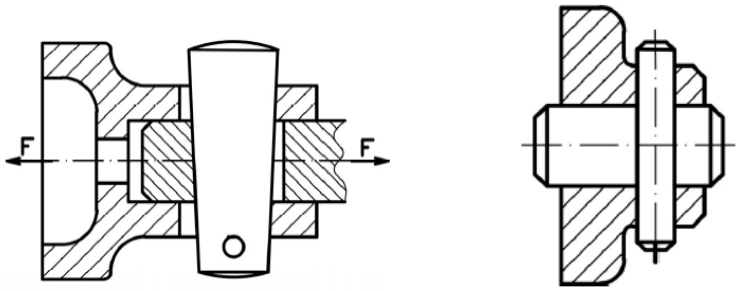
Ožljebljeni spoj vratila i glavčine - koristi se za prenošenje većih obrtnih momenata, umjesto klinova za spajanje vratila i glavčine. Profil žljebova, kao i njihov broj, definisan je standardom. Isti žljebovi se nalaze na vratilu (Slika 2.22b) i u otvoru glavčine prenosnika (Slika 2.22c) koji igraju ulogu klinova.



Slika 2.22. Ožljebljeni spoj

Poprečni klinovi - služe za međusobno spajanje različitih mašinskih dijelova. Poprečni klin je koničan sa jedne ili sa obe strane da bi se zaštitio od ispadanja. Može da ima otvor na užem kraju za osigurač od ispadanja. Usljed opterećenja radnom silom *F* poprečni klin je izložen naprezanju na smicanje i na savijanje (Slika 2.23a).

Čivije - su poseban oblik poprečnih klinova i kružnog poprečnog presjeka manjih dimenzija. Mogu biti cilindrične ili konične, šuplje, elastične (razrezane) itd. Najčešće se čivije koriste za spajanje poluga i sl. Koriste se za manja opterećenja (Slika 2.23b).



a) b)

Slika 2.23. Spajanje dijelova poprečnim klinom a) spajanje dijela za osovinu pomoću čivije b) (Gligorić, 2020)

Oštećenja na klinovima i održavanje klinova

Najčešća oštećenja koja se javljaju pri radu sa klinovima su:

- Kod uzdužnih klinova su deformacije pri montaži i demontaži i deformacije ili prelom usljed preopterećenja na smicanje,
- Kod poprečnih klinova i čivija oštećenja mogu biti u vidu smicanja i savijanja.

Pri upotrebi klinova treba voditi računa da se zaštite od korozije i da se klin ne ošteti i deformiše pri zabijanju i izbijanju. Montaža i demontaža klina treba da je pažljiva i zbog ostalih dijelova na vratilu, prvenstveno ležaja. Pravilno održavanje i korištenje klinova podrazumijeva da se ne preopterećuju. Radno opterećenje propisuje proizvođač mašine ili sklopa u kojem se klin nalazi.

2.1.1.3. Opruge

Mašinski elementi koji elastično i razdvojivo spajaju mašinske dijelove nazivamo oprugama. Ostali zadaci opruga kao mašinskih elemenata su:

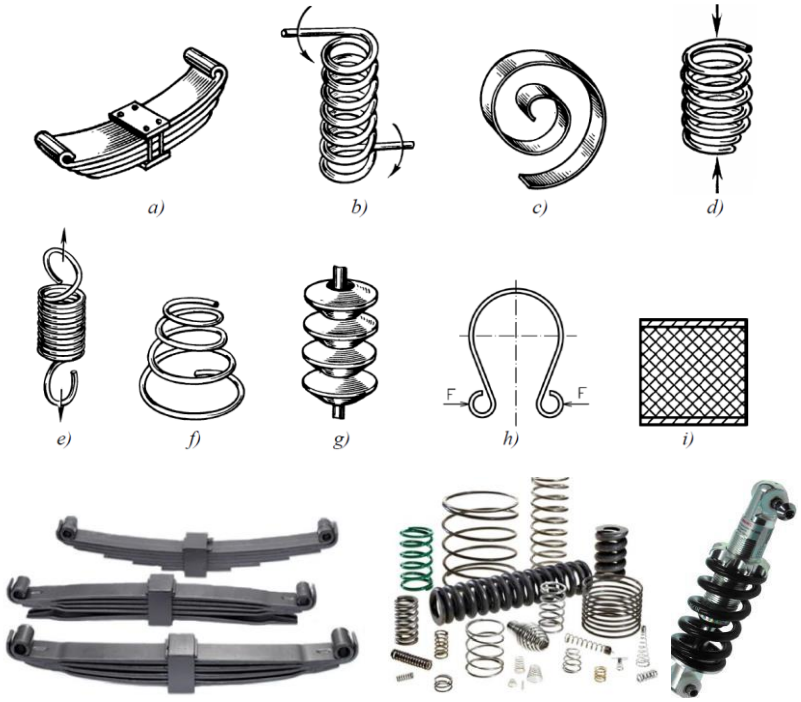
- Amortizovanje udara, npr. na vozilima,
- Prigušenje vibracija,
- Akumuliranje energije,
- Ostvarivanje prinudnog kretanja mašinskih dijelova, (npr. kod sigurnosnih spojnica),
- Ograničavanje pritiska fluida, (npr. kod ventila).

Razlikuju se sljedeće vrste opruga (Slika 2.24):

- Fleksione opruge – podvrgnute su naprezanju usljed savijanja (prikazi a, b i c).

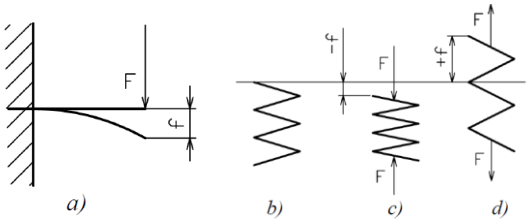
- Torzione opruge – izložene su naprezanju izazvanom uvijanjem (prikazi d, e i f).
- Opruge sa složenim naprezanjem – podvrgnute su kombinovanim naprezanjima (prikaz g).
- Opruge različitih oblika – mogu biti opterećene savijanjem (prikaz h) ili nekim drugim vrstama naprezanja.
- Elastični gumeni elementi – trpe naprezanja poput sabijanja ili drugih vrsta deformacija (prikaz i).

Materijali za opruge – Osnovni materijali su čelici sa velikim sadržajem C do 1,18 %, legirani čelici sa Si, Mn, Cr, V i višestruko legirani čelici. Materijali za opruge moraju da budu izuzetno elastični i čvrsti, da mogu da nose velike napone koji su najčešće promjenljivi. Pored čelika za izradu opruga koriste se mesing, bronza, guma, plastične mase itd.



Slika 2.24. Različite vrste opruga (Gligorić, 2020)

Osnovne karakteristike opruga su: jedinični ugib *C*, krutost opruge *c* i deformacijski rad *A*. Opruge obavljaju svoju funkciju zahvaljujući ugibu (deformaciji) koji se javlja pod opterećenjem, a po prestanku djelovanja opterećenja ugib nestaje (Slika 2.25). Pri dejstvu sile *F* na sabijanje (Slika 2.25c), torziona opruga ima negativan ugib (*-f*), pri dejstvu na istezanje (Slika 2.25d) javlja se pozitivan ugib (*f*). Ako se torziona opruga preoptereti tako da dodje do dodirivanja zavojaka ona će biti uništena, tj. prestaje biti opruga. Nakon prestanka dejstva sile, opruga treba da se vrati u svoj prvobitni položaj.



Slika 2.25. Ugib opruge: a) fleksiona opruga, b), c), d) torziona opruga

Veličina deformacije opruga (*f*) zavisi od: opteredenja (*F*), vrste opruge, dimenzija, materijala, načina ugradnje itd. Uzajamna zavisnost opterećenja i deformacija opruga može biti proporcionalna ili ne proporcionalna. Jedinični ugib *C* ili karakteristika opruge predstavlja odnos ugiba (deformacije opruge) *f* i sile *F* .

$$C = tg\alpha = \frac{f_2 - f_1}{F_2 - F_1} = \frac{f}{F}\left(\frac{mm}{N}\right).$$

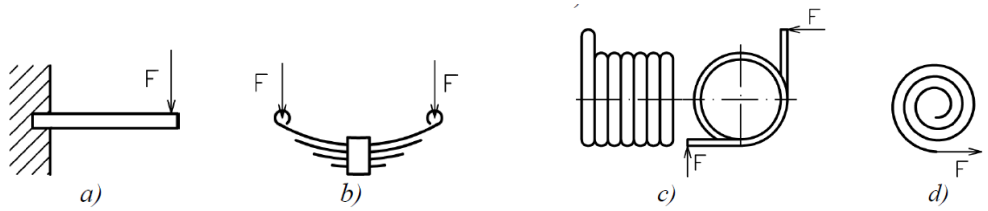
Krutost opruge *c* je recipročna vrednost jediničnog ugiba C i predstavlja odnos sile i ugiba, a određuje se prema izrazu:

$$c = \frac{F_2 - F_1}{f_2 - f_1} = \frac{F}{f}\left(\frac{N}{mm}\right).$$

Deformacijski rad *A* predstavlja rad koji je uložen za deformaciju opruge koji nakon toga može da se koristi.

A) Fleksione opruge

Fleksione opruge su izložene savijanju. Mogu biti (Slika 2.26): lisnate (a), gibnjevi (b), zavojne (c) i spiralne (d).



Slika 2.26. Vrste fleksionih opruga

Lisnate opruge - jednostavnog su oblika i koriste se za ručne alate (makaze za rezanje), u bravarskoj i preciznoj mehanici za razne alate (tada je obično jedan krak pričvršćen, a drugi je slobodan). Mogu biti jednokrake i dvokrake. Najjednostavnija lisnata jednokraka opruga je konzola od opružnog materijala (Slika 2.27a). Na isti način se prave i dvokrake opruge (Slika 2.27b). Kritičan poprečni presjek dvokrake lisnate opruge je na sredini. Stoga je na ovom mjestu najveći poprečni presjek, a smanjuje se prema krajevima na b_o ili do $b_o=0$.

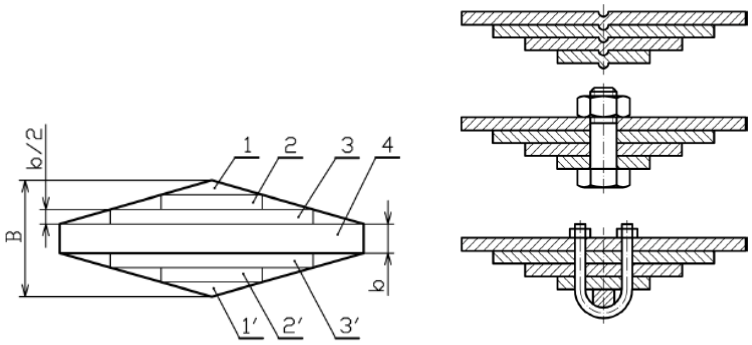


a) b)

Slika 2.27. Lisnate opruge

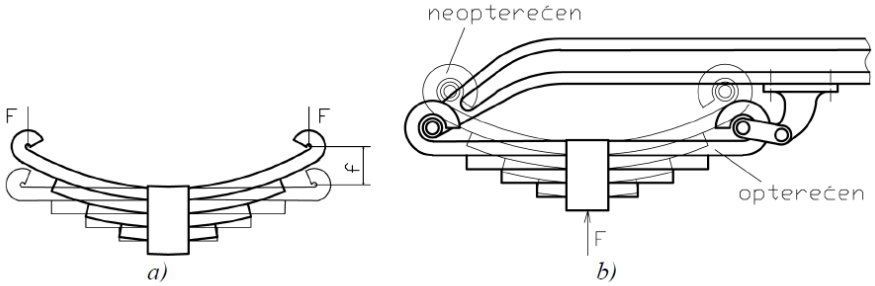
Gibnjevi su dvokrake lisnate opruge koje se sastoje od više međusobno povezanih listova i služe za oslanjanje vozila. Gibanj se formira podjelom ukupne širine opruge B na više listova širine b/2, označenih kao (1 i 1'), (2 i 2'), (3 i 3') i tako dalje, dok je središnji glavni list širine b (Slika 2.28.a). Ovi listovi slažu se jedan na drugi kako bi se formirala opruga. Spojevi listova gibnja u sredini mogu biti izvedeni na različite načine, zavisno od veličine opterećenja i

potrebnog ugiba. Kod manjih opterećenja i ugiba, listovi se mogu spojiti pomoću odgovarajućih ispusta (Slika 2.28.b), vijaka, uzengija ili drugih metoda.
U neopterećenom položaju gibanj ima određeni ugib f (Slika 2.29.a). Kada se optereti maksimalnom silom F, listovi zauzimaju horizontalni položaj (Slika 2.29.b).



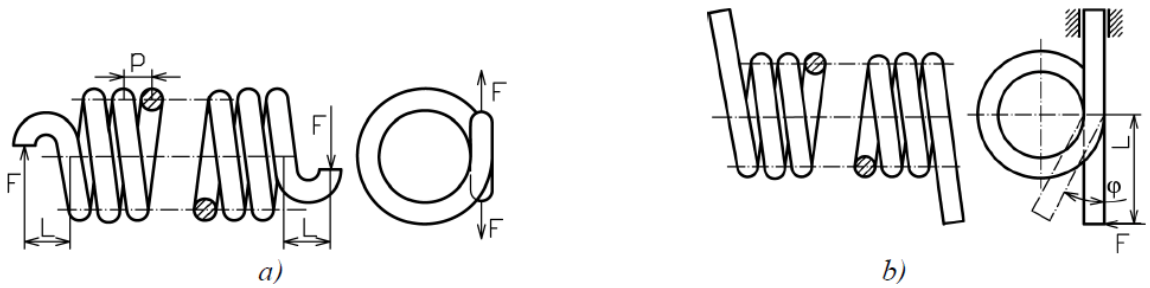
a) b)

Slika 2.28. Listovi gibanja



Slika 2.29. Opterećenje gibnja (Gligorić, 2020; Ercegović, 1994)

Fleksiona zavojna opruga formira se namotavanjem žice okruglog poprečnog presjeka na valjak pod određenim uglom uspona i koraka opruge p (Slika 2.30a). Ova vrsta opruge koristi se za elastično spajanje poklopaca, povratni hod mašinskih dijelova, poluga i slične primjene. Završeci žice oblikovani su tako da mogu preuzeti silu F, koja djeluje upravno na uzdužnu osu opruge, najčešće u smjeru zavojaka. Pod uticajem sile F, opruga se savija za ugao φ (Slika 2.30b) i time trpi naprezanje usljed savijanja.

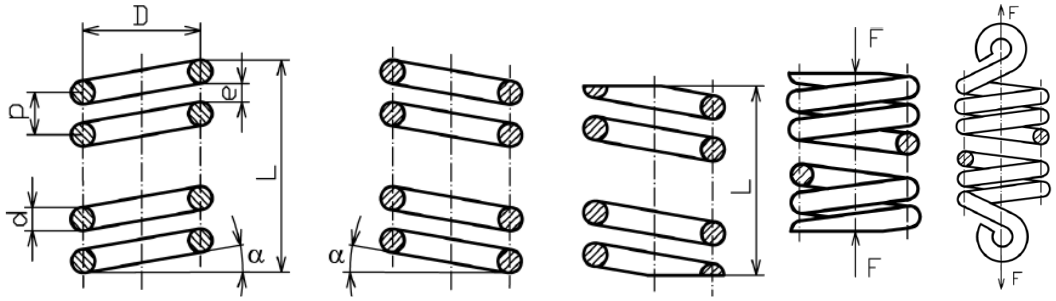


Slika 2.30. Fleksiona zavojna opruga (Gligorić, 2020)

B) Torzione opruge

Torziona zavojna opruga formira se namotavanjem žice kružnog poprečnog presjeka, prečnika Ød, oko valjka prečnika ØD, prateći zavojnicu pod uglom uspona α na desnu (Slika 2.31a) ili lijevu stranu (Slika 2.31b). Geometrijski parametri torzione opruge uključuju korak zavojnice p, razmak između susjednih zavojaka e i ukupnu dužinu opruge L. Krajevi opruge često se

sravnjuju kako bi se omogućilo bolje prijanjanje na dodirne površine (Slika 2.31c). Iako je žica najčešće kružnog presjeka, može biti i kvadratnog, pravougaonog ili u obliku užeta. Torzione cilindrične opruge s kružnim presjekom žice imaju najširu primjenu u mašinskim konstrukcijama. Na Slici 2.31d prikazana je pritisna torziona opruga, dok je vučna prikazana na Slici 2.31c.

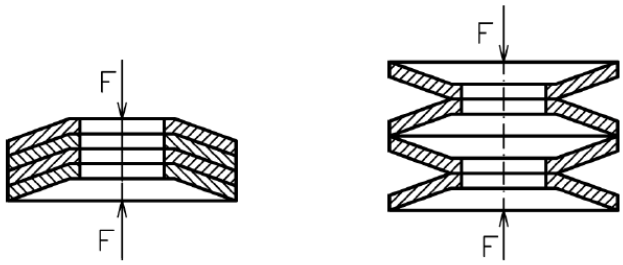


a) b) c) d) e)

Slika 2.31. Osnovni parametri torzione opruge

C) Opruge izložene složenom naprezanju

Za elastično prenošenje velikih sila sa malim ugibima koriste se tanjiraste (pločaste) opruge koje su izložene složenom naprezanju (Slika 2.32).Tanjiraste opruge se slažu jedna na drugu u različitim kombinacijama čime se postiže odgovarajuća nosivost, krutost i ugib.



Slika 2.32. Tanjiraste opruge

Pravilno korišćenje opruga podrazumijeva da se ne izlažu prevelikom opterećenju, da se pravilno zaštite od korozije, I da se zaštite od pregrijavanja. Pri velikim preopteredenjima opruga se trajno deformiše i uništi. Korozija utiče na gubitak elastičnih svojstava opruga. Ako dođe do pregrijavanja materijal opruge gubi karakteristike koje su dobijene termičkom obradom. Kada opruga izgubi elastična svojstva i elastične karakteristike, treba je zamijeniti novom, određenih dimenzija i krutosti.

2.1.2. Mašinski elementi za nerazdvojivu vezu

U mašinske elemente za nerazdvojivu vezu ubrajaju se: zakovice, zavareni, lemljeni i lijepljeni spojevi kao i presovani spojevi. Najzastupljeniji su zavareni spojevi (Mumibović i Mesić, 2016).

Zavareni spojevi

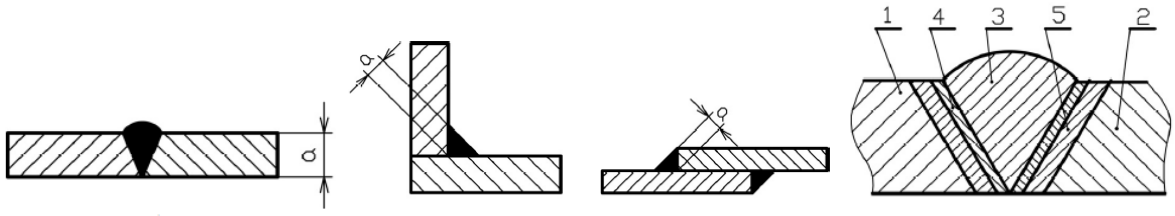
Čelici, uključujući sve njihove vrste, predstavljaju najpogodnije materijale za zavarivanje. Iako se mogu zavarivati i drugi tehnički materijali, neki od njih zahtijevaju jednostavnije, a neki složenije postupke, dok se određeni materijali mogu zavarivati samo pod specifičnim

uslovima. Pored čelika, zavarivanju podliježu čelični livovi, obojeni metali poput bakra, bronze, cinka, aluminijuma i njihovih legura, kao i određene vrste plastičnih masa. Za neke materijale potrebni su posebni uslovi i tehnike, što može povećati troškove izrade konstrukcija.

Zavarivanje se izvodi na sljedeće načine:

- Topljenjem uz dodatak materijala,
- Topljenjem bez dodatka materijala,
- Primjenom pritiska.

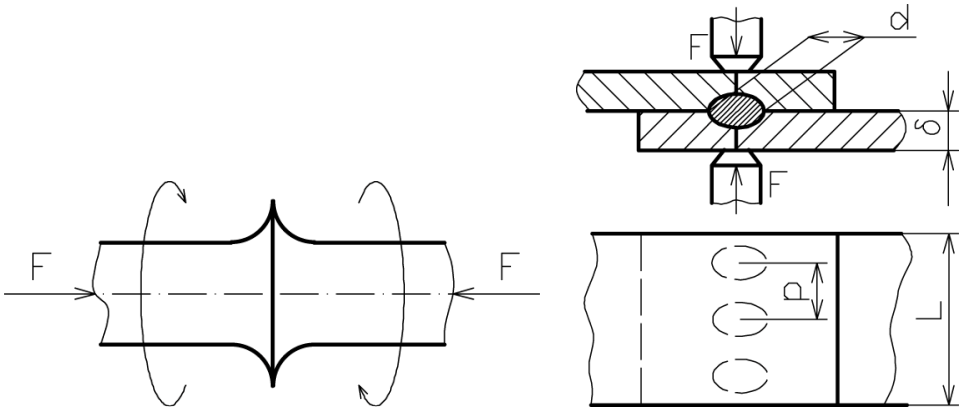
Zavareni sastavci dobijeni topljenjem sa dodavanjem materijala mogu biti: čeoni, ugaoni i preklopni (Slika 2.33). Površina vara je hrapava, te da bi se smanjila pojave korozije obrađuje se brušenjem.



a) b) c) d)

Slika 2.33. Vrste vara: a) čeoni, b) ugaoni, c) preklopni, d) var nastao topljenjem materijala

Zavareni spoj nastao topljenjem bez dodavanja materijala postiže se pod pritiskom tako što se krajevi dijelova koji se spajaju razmekšaju pomoću trenja (Slika 2.34a) ili pomoću električnog otpora (Slika 2.34b).

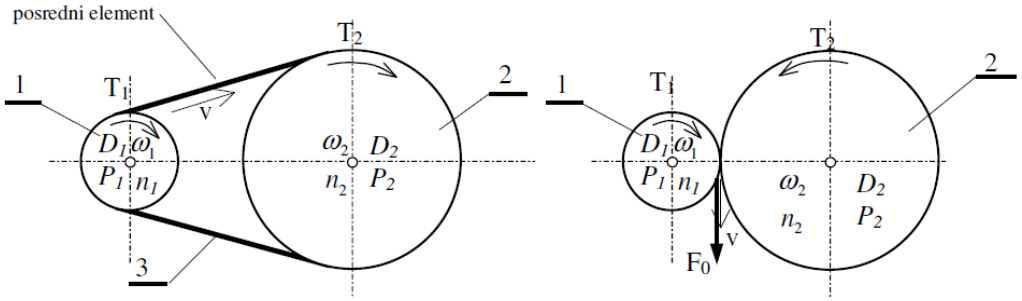


a) b)

Slika 2.34. Zavarivanje topljenjem bez dodavanja materijala

2.2. Mašinski elementi za prenos snage

Pod prenosnikom snage se podrazumijeva mehanizam koji pretvara izlazne parametre pogonskog motora i prilagođava ih zahtjevima radnih organa prilikom prenosa mehaničke energije na radne organe mašine.



Slika 2.35. Posredni (remenski) prenos-lijevo i neposredni (frikcioni) prenos-desno

Namjena elemenata za prenos obrtnog kretanja je prenos obrtnog kretanja i energije od pogonske do radne mašine, pri čemu se najčešće mijenja ugaona brzina i obrtni moment. Prema načinu rada ovi elementi mogu biti posredni i neposredni. Npr. remenski prenos (Slika 2.35a) je posredni gdje remen predstavlja posredni element, dok je frikcioni prenos (Slika 2.35b) neposredni.

Osnovne veličine su:

- Obodna brzina *v*:

$$v = r\,\omega = \frac{D}{2}\frac{2\pi n}{60} = \frac{D\pi n}{60} \quad [\mathrm{m/s}]$$

- Ugaona brzina: w [rad/s ili s^{-1}]
- Obodna brzina: *n* [o/min ili min^{-1}]
- Pošto se pri prenosu javljaju gubici snage, stepen iskorištenja η:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} < 1$$

- Obrtni moment i obodna sila:

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega_1} \quad [Nm] \qquad T_2 = \frac{P_2}{\omega_2} \quad [Nm]$$

$$F_{01} = \frac{2T_1}{D_1} \quad [N] \qquad F_{02} = \frac{2T_2}{D_2} \quad [N]$$

- Prenosni odnos *i*:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{T_2}{\eta T_1}$$

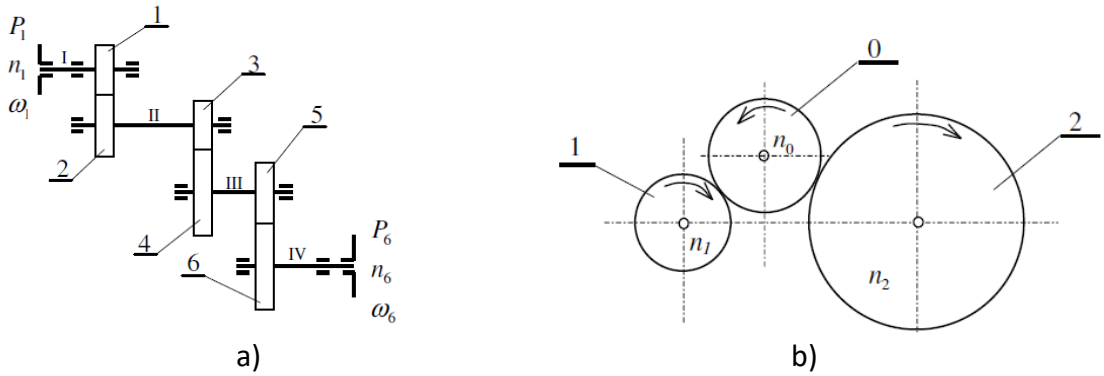
gdje je z broj zuba pogonskog zupčanika 1, odnosno gonjenog zupčanika 2.

Ukoliko se brzina obrtanja povećava, tj. multiplicira, dakle $n_2 > n_1$, prenosnici se zovu multiplikatori. Ukoliko se brzina smanjuje, dakle $n_2 < n_1$, prenosnici se zovu reduktori. Ukoliko je brzina kontinuirano promjenljiva, $n_2 = f(n_1)$, riječ je o varijatorima. Prenosni odnos može biti složen iz više stepena (Slika 2.36a), pa je ukupni prenosni odnos proizvod pojedinačnih prenosnih odnosa:

$$i = \frac{n_1}{n_6} = \frac{n_I}{n_{IV}} = \frac{n_1}{n_2}\frac{n_3}{n_4}\frac{n_5}{n_6} = i_1\, i_2\, i_3$$

Pošto se radi o zupčanicima na istim vratilima, brojevi okretaja vratila II su $n_{II} = n_2 = n_3$ te brojevi okretaja vratila III su $n_{III} = n_4 = n_5$. Ukupni stepen iskorištenja jednak je proizvodu pojedinačnih stepeni, tj.

$$\eta = \frac{P_{IV}}{P_I} = \frac{P_2}{P_1}\frac{P_4}{P_3}\frac{P_6}{P_5} = \eta_1 \eta_2 \eta_3$$



a) b)

Slika 2.36. Stepenasti prenos zupčanicima a), promjena smjera obrtanja sa ubačenim međuzupčanikom b)

Kod neposrednih prenosnika smjer okretanja krugova tj. cilindara je suprotan (ukoliko se ne radi o kombinaciji unutrašnjeg i vanjskog ozubljenja). Kod posrednih prenosnika (ukoliko se ne radi o ukrštenom remenu) i neposrednih sa umetnutim prenosnikom, obrtanje u istom smjeru. Umetnuti prenosnik (zupčanik ili frikcioni točak), osim što mijenja smjer obrtanja, ne utiče na prenosni odnos (Slika 2.36b).

$$i = i_1 i_2 = \frac{n_1}{n_0}\frac{n_0}{n_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

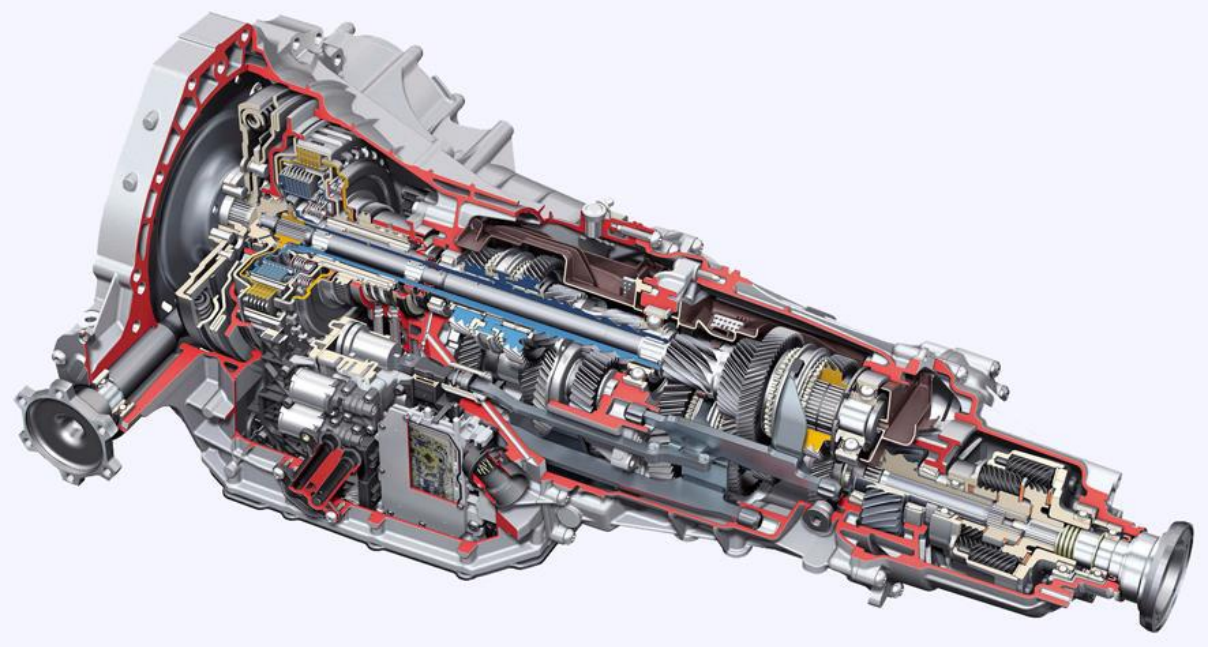
Prenosnici snage mogu biti: mehanički, električni, hidraulični, pneumatski i kombinovani.

2.2.1. Mehanički prenosnici snage

Dijele se na:

- Prenosnike koji se baziraju na sili trenja (frikcioni točkovi i kaišni prenosnici) i
- Prenosnike koji se baziraju na zupčenju (zupčanici i lančani prenosnici) (Slika 2.37).

Prenosnici koji se baziraju na sili trenja nazivaju se još elastičnim jer obezbjeđuju pogon od preopterećenja, a prenosnici zasnovani na zupčenju zovu se još i prinudnim jer je veza kruta i sa stalnim prenosnim odnosom.

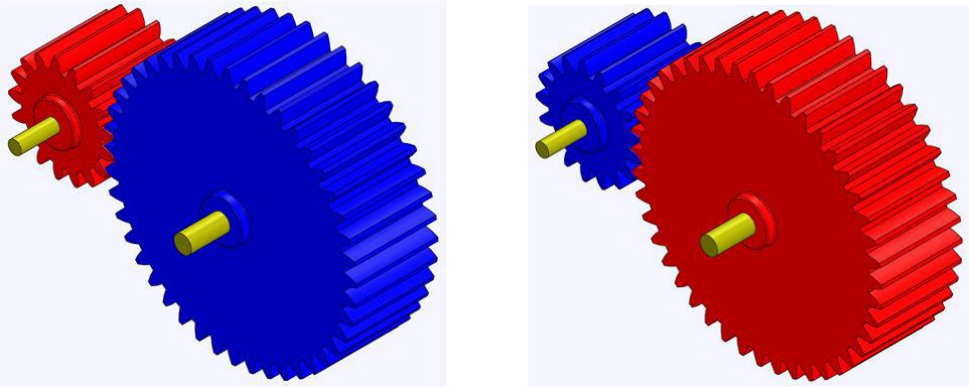


Slika 2.37. Zupčasti prenosnik - Audi Q5 S-Tronic mjenjač

Prenosnik snage je mehanizam koji prenosi snagu sa pogonskog motora na radne organe mašine. Pri tome prilagođava parametre motora potrebama radnih organa mašine – usaglašava režime rada motora i radnih organa. Svaki prenosnik snage ima pogonsko ili ulazno vratilo i gonjeno ili izlazno vratilo.

Glavne karakteristike prenosnika snage su:

- Snaga na ulazu - *Pul*
- Snaga na izlazu – *Piz,* i uvijek je *Piz< Pul*
- Brzohodnost – učestalost obrtanja na ulazu *nul* i izlazu *nizl*
- Prenosni odnos *i,* koji se uvijek računa u pravcu toka snage. Za *i* > 1 prenosnik je reduktor, za *i* < 1 prenosnik je multiplicator (Slika 2.38).
- Stepen korisnog dejstva η koji određuje gubitak snage u prenosniku. η = *Piz/ Pul<1*



Slika 2.38. Reduktor (lijevo-pogonski zupčanik je mali) i multiplikator (desno pogonski zučanik je veliki)

Glavni tipovi mehaničkih prenosnika su:

- Frikcioni (snage do 20 *kW*),
- Remeni ili kaišni (snage do 100 *kW*),
- Lančani (snage do 100 *kW*)
- Zupčasti (snage do 50 000 *kW*).

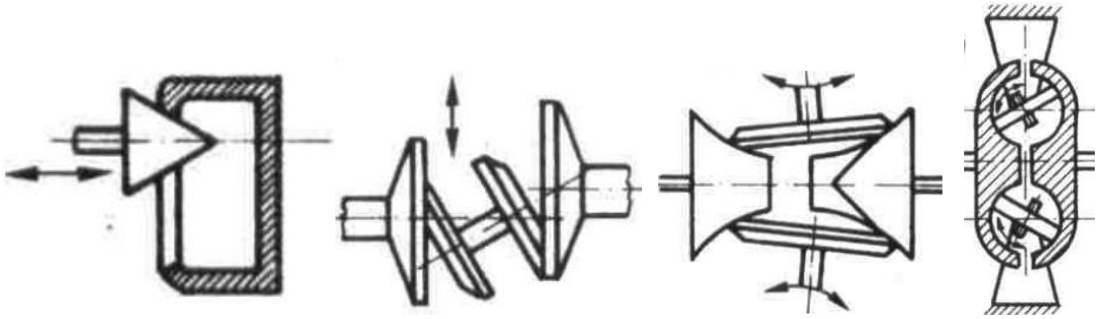
Prva dva tipa rade na principu trenja, a ostala dva na principu zupčanja. Remeni ili kaišni prenosici mogu da rade na oba navedena principa.

Frikcioni prenos

Sastoji se od najmanje dva elementa koji se neposredno dodiruju i prenose snagu silom trenja, koja nastaje kao posljedica konstantnog pritiska između njih. Najčešće se koriste radi kontinualne promjene prenosnog odnosa i tada se nazivaju varijatori. Takođe se koriste za promjenu smjera okretanja (reverzibilnost).

Frikcioni prenosnik je najjednostavnije konstrukcije i sastoji se od dva frikciona točka koja prenose okretno kretanje putem sile trenja na njihovim dodirnim površinama. Prema obliku frikcionih točkova razlikuju se cilindrični i konični frikcioni prenosnici (Slika 2.39).

Prednosti frikcionih prenosnika su: omogućavaju vrlo jednostavne izvedbe varijatora, omogućavaju ravnomjerno okretanje i bešuman rad, vrlo su jednostavne konstrukcije i jeftini, sigurni su od loma zbog mogućnosti proklizavanja pri preopterećenju. Nedostaci frikcionih prenosnika su: brzo trošenje tarnih ploča, zahtijevaju velike sile međusobnog pritiska kako bi se ostvarilo dovoljno veliko trenje, loš stepen iskorištenja ($\eta = 75 \div 95\%$), zbog proklizavanja nestalan prenosni odnos (proklizavanje 2÷5%).



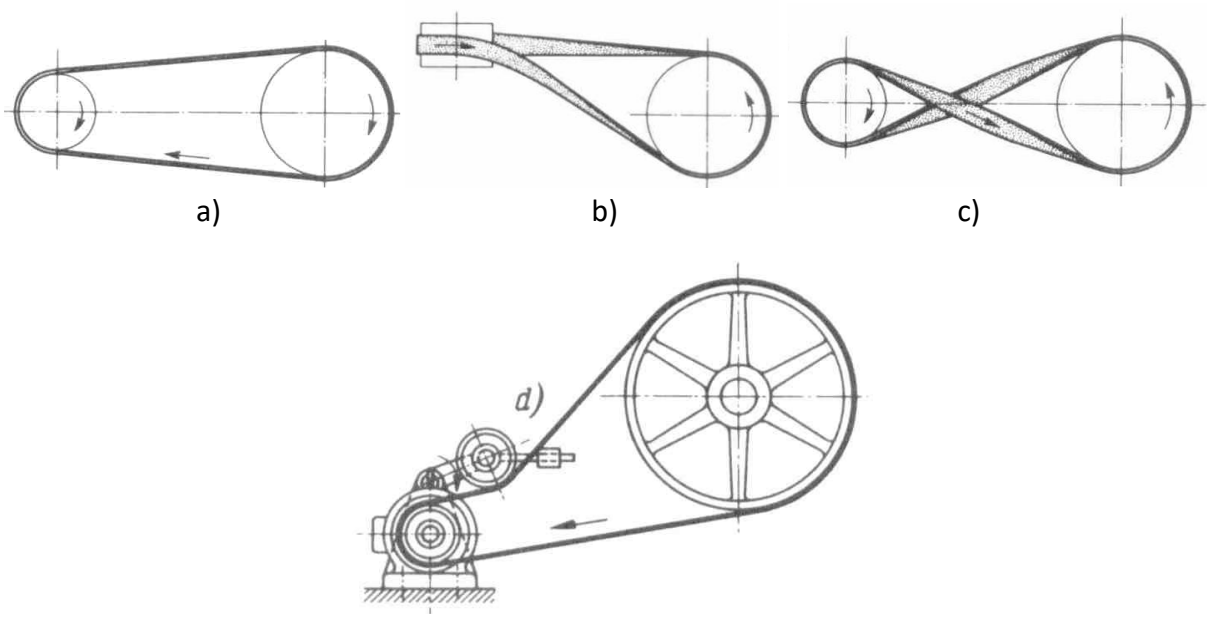
Slika 2.39. Različite izvedbe frikcionih prenosnika sa varijabilnim prenosnim odnosom - varijatori (Decker, 1980)

Remeni (kaišni) prenos

Remeni prenosni parovi prenose mehaničku energiju između vratila koja su na određenom rastojanju. U toku rada ne stvaraju dinamička opterećenja, buku i vibracije. Rade bez zazora u prenosu što je slučaj kod zupčastih parova.

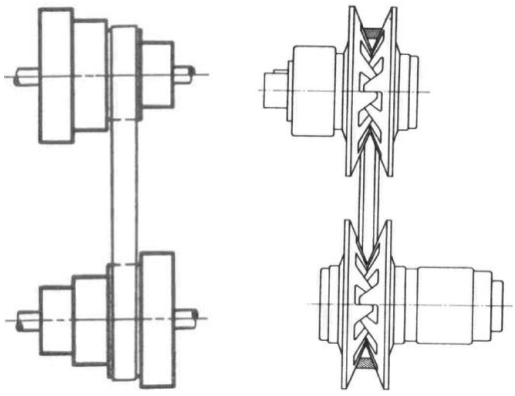
Remenskim prenosom se, poput frikcionog, obrtni moment prenosi silama trenja do kojih dolazi zbog predzatezanja remena. Remenice su međusobno razmaknute te je remenskim prenosom moguće savladavati i veće udaljenosti između pogonskog i gonjenog vratila. Remenskim prenosom se može prenositi obrtni moment na paralelnim i mimoilaznim vratilima. Osnovni elementi remenskog prenosa su remen te pogonska i gonjena remenica.

Za povećanje obuhvatnog ugla, od kojeg u velikoj mjeri zavisi koliki se obrtni moment može prenijeti, te za povećanje sile predzatezanja, koristi se zatezna remenica (Slika 2.40).



Slika 2.40. Položaj vratila u remenskom prenosu: a) paralelna vratila-otvreni prenos, b) mimoilazna vratila (polukružni prenos), c) ukršteni prenos, d) zatezna remenica (Decker, 1980)

Osnovne prednosti remenskog prenosa su tihi rad, sposobnost apsorpcije udarnih opterećenja zahvaljujući mogućnosti proklizavanja, jednostavnost i niske troškove izvedbe, te mogućnost prenosa kretanja u istom ili suprotnom smjeru. Također, remenski prenos omogućava lako isključivanje iz rada jednostavnim skidanjem remena, a proklizavanje štiti od loma. Promjena prenosnog odnosa može se lako ostvariti korištenjem varijatora (Slika 2.41). Međutim, remenski prenos ima i određene nedostatke. U poređenju sa zupčanicima, remenski prenos zahtijeva veće dimenzije. Ležajevi su izloženi velikim opterećenjima zbog potrebnih sila trenja, dok remeni vremenom trpe trajne deformacije, što zahtijeva njihovu periodičnu zamjenu. Faktor trenja nije stalan, a primjena remenskog prenosa je ograničena na manje osne razmake zbog smanjenog obuhvatnog ugla.



Slika 2.41. Variranje prenosnog odnosa (Decker, 1980)

Postoje tri osnovna tipa remenskog prenosa:

- Prenos plosnatim remenom,
- Prenos klinastim remenom,
- Prenos zupčastim remenom.

Prenos pljosnatim remenom

Pri analizi sila koje djeluju na pogonsku remenicu (Slika 2.42), veličina sile koju remenica može prenijeti zavisi od obuhvatnog ugla i od koeficijenta trenja μ. Isto vrijedi za gonjenu remenicu. Ukoliko se pretpostavi da je remenica nepokretan cilindar preko koga se prevlači pljosnati remen, pri čemu je $F_1 > F_2$, odnos među ovim silama definisan je Eulerovom jednačinom.

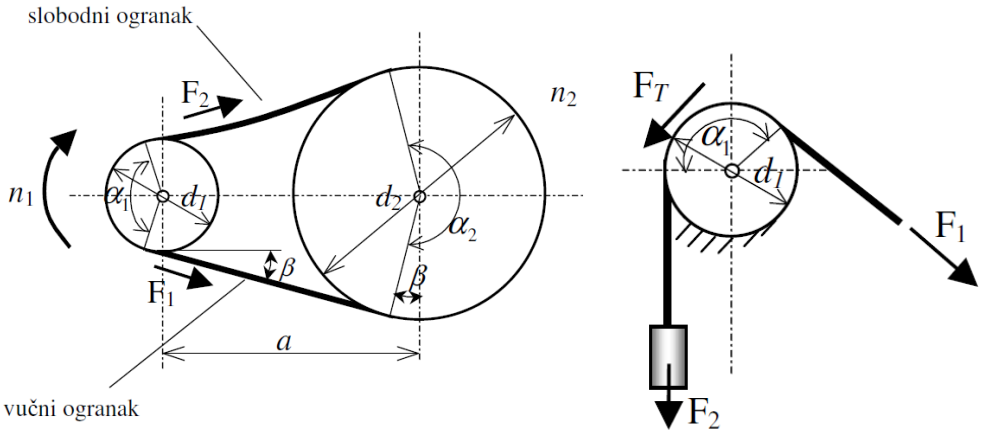
$$F_1 = F_2 e^{\mu\tilde{\alpha}}$$

gdje je *e* baza prirodnog logaritma, *e* = 2,71828.... Razlika između ovih sila je sila trenja FT, koja predstavlja obodnu silu koju remen prenosi. Zbog razlike u silama dolazi do različitih deformacija remena, pri čemu se on naizmjenično produžava i skraćuje, što uzrokuje pojavu poznatu kao puzanje. Puzanje iznosi između 1 i 2% i obično se zanemaruje u proračunima. Kako bi se smanjilo trošenje remena uslijed puzanja, površina remenice se izrađuje sa što manjom hrapavošću. Sila koja djeluje na vratilo rezultat je djelovanja sila F1 i F2, pri čemu se njihova ukupna sila može izraziti kao rezultanta ovih dviju komponenti.

$$F_v = F_1 + F_2$$

odnosno iz kosinusne teoreme je:

$$F_v = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\alpha_1}$$



Slika 2.42. Geometrijske karakteristike remenskog prenosa

Iz prethodne formule može se zaključiti da obodna sila koju remen prenosi zavisi od prednaprezanja remena i veličine obuhvatnog ugla. Kako bi se povećao obuhvatni ugao na manjoj remenici, preporučuje se postavljanje remenice što dalje od gonjene remenice ili upotreba zateznih remenica. Veliki razmak između horizontalnih remenica doprinosi dodatnom predzatezanju remena uslijed njegove težine.

Tokom rotacije, centrifugalne sile izazivaju međusobno razdvajanje remena, što doprinosi efektu samozatezanja. Kao rezultat toga, remen koji na početku proklizava prestaje proklizavati kada se postigne radni broj obrtaja.

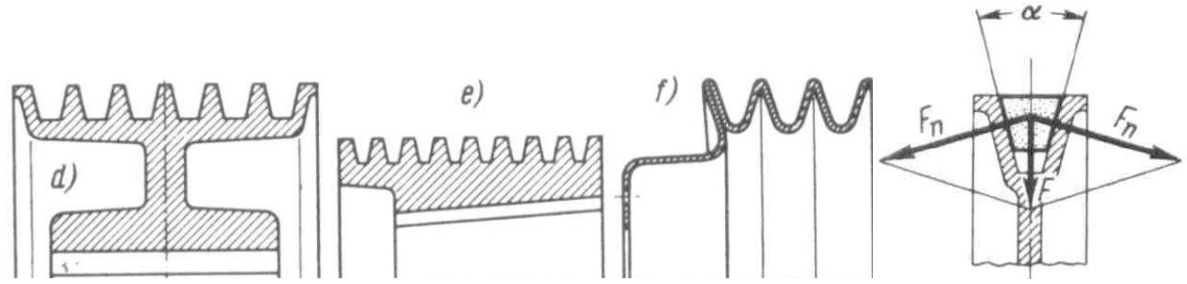
Prenosni odnos remenskog prenosa je:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

Realni prenosni odnos je nešto manji od teorijskog zato što je uvijek prisutno klizanje. Od materijala od kojih se izrađuje remen zahtijeva se: veliki koeficijent trenja, velika čvrstoća na kidanje, velika elastičnost s malom trajnom deformacijom, velika dinamička izdržljivost (radi učestalog savijanja), neosjetljivost na atmosferske utjecaje i ulja. Materijali iz kojih se rade pljosnati remeni su: koža, tkanine: organskog (pamuk, svila, celulozna vuna, konoplja i životinjske dlake) I sintetičnog porijekla (umjetna svila, najlon i perlon), umjetne mase: poliamidi, najlon i perlon. Najčešće se koristi najlon u kombinaciji s gumom ili kožom gdje se postižu dobra nosiva svojstva, a sloj kože osigurava dobra tribološka svojstva.

Prenos klinastim remenom

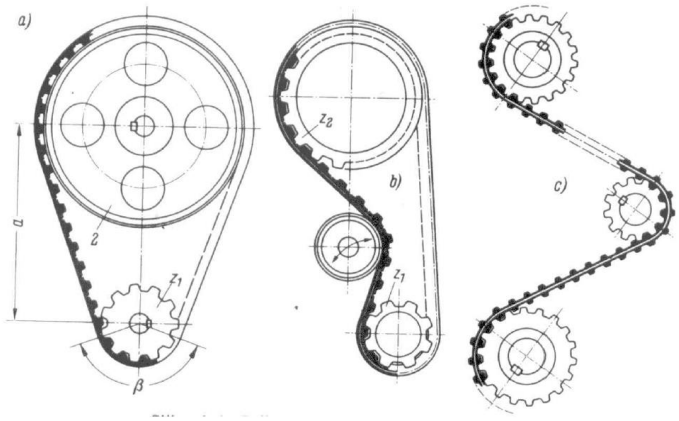
Klinasti remeni su gotovo u potpunosti zamijenili pljosnate remene. Njihova glavna prednost leži u sposobnosti da, zahvaljujući djelovanju klina (Slika 2.43), prenose do tri puta veću obodnu silu u poređenju sa pljosnatim remenima. To rezultira manjim opterećenjem na vratilu remenica. Puzanje je kod klinastih remena zanemarljivo. Zahvaljujući većoj obodnoj sili, klinasti remeni omogućavaju smanjenje osnih razmaka i obuhvatnih uglova, čime se mogu koristiti manji i kompaktniji prenosnici. Njihova mala širina omogućava postavljanje više remena paralelno za prenos velikih obrtnih momenata. Ugao profila klina iznosi približno a ≈ 36°. Smanjenje ovog ugla uzrokovalo bi samokočni efekat, što bi dovelo do prekomjernog habanja remena. Klinasti remeni se najčešće proizvode u beskonačnom obliku, iako postoje i konačne verzije. Izrađuju se od gume s upletenim tekstilnim nitima radi povećanja čvrstoće. Kod klinastog remenskog prenosa ključno je osigurati da remen ne dodiruje dno remenice, kako bi se omogućilo pravilno uklinjenje remena u remenici. Odgovarajući profil remena bira se prema tabličnim vrijednostima.



Slika 2.43. Izvedbe klinastih remenica I sile na klinastom remenu

Prenos zupčastim remenom

Zupčasti remeni, u kombinaciji s ozubljenim remenicama, prenose obrtni moment kroz kontakt oblika (Slika 2.44). Vučna sila se prenosi preko čeličnog pletiva, izrađenog od beskonačnih prstenova žice, koji su ugrađeni u plastičnu masu poput neoprena. Za velike prenosne odnose, gdje je i ≥ 3,5 i gdje veća remenica ima veliki prečnik, moguće su izvedbe sa glatkom većom remenicom zbog povećanog obuhvatnog ugla. Plastični materijali koji se koriste za izradu remena otporni su na habanje, ulja, benzin, alkohol, ozon i sunčevu svjetlost, čime se osigurava dugotrajnost i pouzdanost. U poređenju s drugim vrstama remenskih prenosa, sile prednaprezanja kod zupčastih remena su značajno manje. Aksijalno vođenje remena, koje sprečava njegovo ispadanje s remenica, ostvaruje se pomoću bočnih rubova na remenicama. Ti rubovi su postavljeni tako da jedan vodi "vanjsku", a drugi "unutrašnju" stranu remena. Kada su obe remenice ozubljene, prenos se odvija bez proklizavanja, što ovu vrstu prenosa čini idealnom zamjenom za skuplje i bučnije lančane prenose. Veličina i profil remena odabiraju se na osnovu sile i brzine rotacije remena.



Sika 2.44. Prenos zupčastim remenom (Decker, 1980)

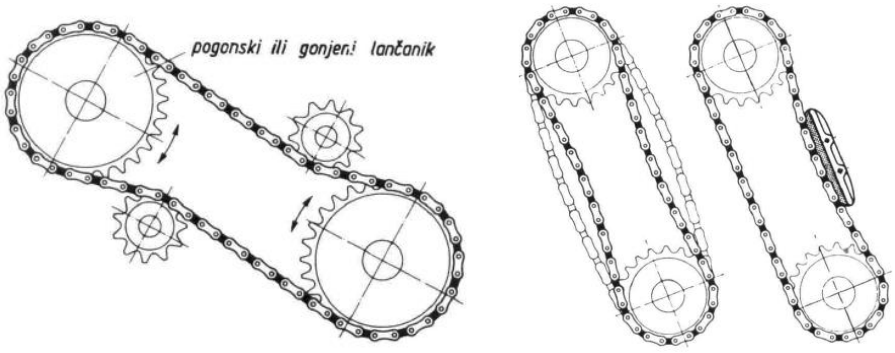


Slika 2.45. Različite izvedbe remenog prenosa

Lančani prenos

Lančani prenosnici idealni su za prenos velikih snaga, posebno kada su osovine vratila međusobno udaljene. Odlikuju se visokim stepenom korisnog dejstva. Međutim, njihovi

nedostaci uključuju istezanje i habanje tokom vremena, kao i bučan rad, što zahtijeva povremeno zatezanje lanca. Vertikalni položaj lanca nije preporučljiv, a upotreba zatežućih lančanika u takvim slučajevima je obavezna. Prenosni odnos obično je i ≤ 7, dok se u posebnim situacijama može povećati do maksimalno 10, a snage koje se prenose dostižu 50 kW. Lančani prenosnici koriste se u situacijama gdje remenski prenos nije moguć, poput slučajeva s malim međuosovinskim razmakom, velikim obodnim silama ili gdje proklizavanje remena nije prihvatljivo (npr. kod podizača ventila u klipnim motorima). Za razliku od remenskih prenosa, lančani prenosnici ne zahtijevaju prednaprezanje, pa su opterećenja na vratilima minimalna. Iako su vrlo kruti i ne omogućavaju ublažavanje udara, zahtijevaju podmazivanje i bučniji su od remenskih sistema. Lančani prenosnici i njihovi elementi skuplji su u poređenju s remenima i remenicama. Preporučuje se da pogonski lančanik bude smješten na gornjoj strani sistema (Slika 2.46a), jer bi smještanje s donje strane moglo uzrokovati slabo zahvatanje pogonskog lančanika zbog progiba lanca. Okomiti položaj osovina lančanika treba izbjegavati, jer povećava habanje lanca. Lanci su skloni plastičnim deformacijama, zbog čega treba predvidjeti mogućnost njihovog zatezanja. Također, lančani prenosnici podložni su vibracijama, što je naročito izraženo kod udarnih opterećenja. U takvim slučajevima vibracije treba prigušiti odgovarajućim prigušivačima (Slika 2.46b).

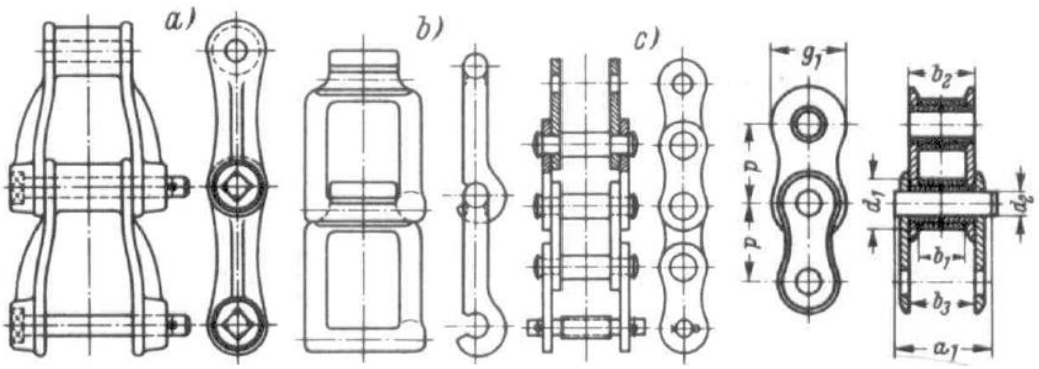


a) b)

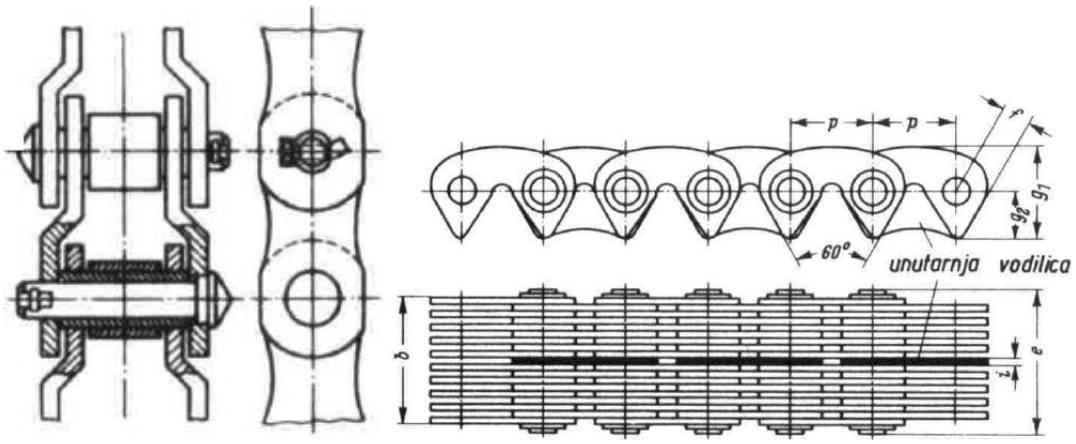
Slika 2.46. Položaj pogonskog lančanika a) i vibracije lanca i položaj prigušivača b) (Decker, 1980)

Postoje člankasti lanci, koji se koriste isključivo za dizanje tereta, te zglobni lanci koji mogu biti:

- Lanci s čeličnim svornjacima (Slika 2.47a) i rastavljivi zglobni lanci (Slika 2.47b) - koriste se kod poljoprivrednih mašina i transportnih uređaja.
- Gallov lanac: sastoji se iz lamela i svornjaka, nisu za veće brzine obrtanja, (Slika 2.47c).
- Valjkasti lanci- neosjetljivi su na vanjske uticaje, pogodni za sve vrste pogona pa se zato i najčešće koriste. Izvode se kao jednostruki, dvostruki i trostruki (Slika 2.47d).
- Rotary lanci: imaju zakrivljene spojnice koje omogućavaju elastičan rad i proizvoljan broj članaka (Slika 2.48a).
- Zupčasti lanci: pogodni za vrlo velike brzine te rade skoro nečujno. Skuplji su od ostalih lanaca (Slika 2.48b).



Slika 2.47. Različiti tipovi zglobnih lanaca (Decker, 1980)



a) b)

Slika 2.48. Rotary lanci a) i zupčasti lanci b) (Decker, 1980)

Zupčasti prenos

Zupčanici su ozubljeni točkovi koji služe za prenos snage sa jednog vratila na drugo. Pored toga mogu da kružno kretanje pretvore u pravolinijsko i obrnuto kada su spregnuti sa zupčastom letvom. Pri tome je moguće da se vratila okreću istom ili različitiom ugaonom brzinom i u istim ili suprotnim smjerovima.

Prednosti su: mali gabariti, velika snaga, visok stepen korisnog dejstva, trajnost. Nedostaci su: vibracije, šumnost, zazori, trošenje u toku rada.



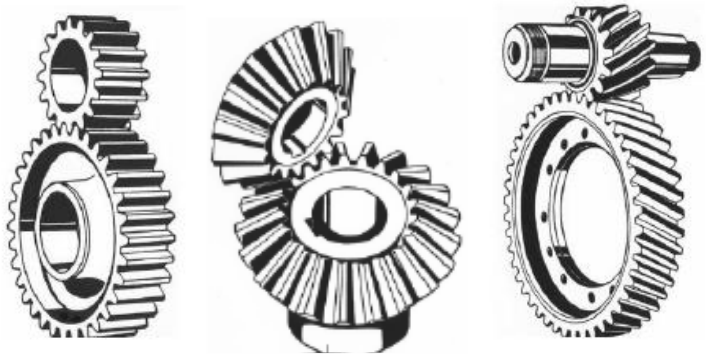
Slika 2.49. Različiti tipovi zupčanika

Zupčanici se mogu podijeliti prema različitim kriterijumima:

- Položaju osa,
- Pravcu zubaca,
- Obliku profila zubaca,
- Principu sprezanja itd.

Podela prema položaju osa vratila

Ose vratila mogu da budu: paralelne, ukrštene pod nekim uglom i mimoilazeće. Prvoj grupi pripadaju cilindrični zupčanici (Slika 2.50a). Drugoj grupi pripadaju konični zupčanici (Slika 2.50b), a trećoj grupi pripadaju hiperboloidni u koje spadaju pužni, hipoidni i vijčani (Slika 2.50c).



a) b) c)

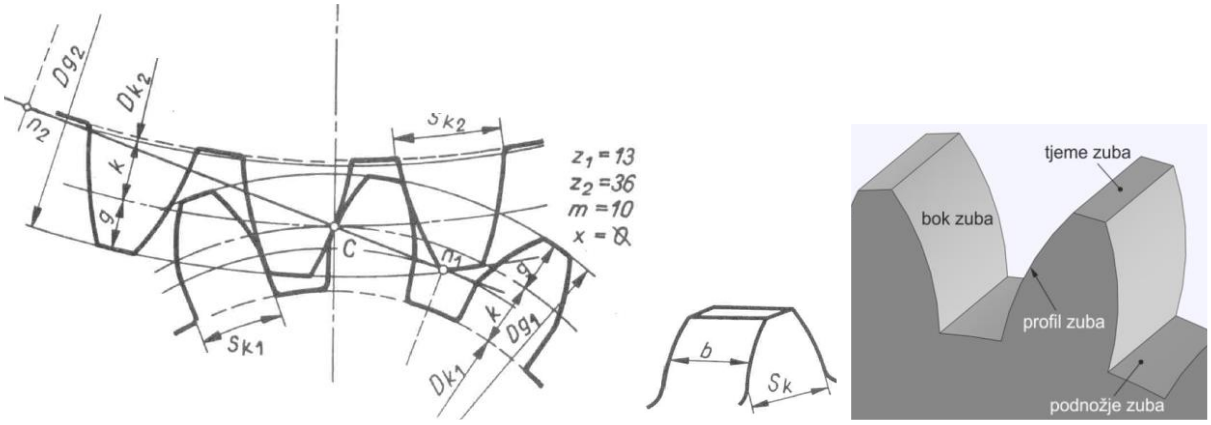
Slika 2.50. Podjela zupčanika prema položaju osa vratila

Materijali za izradu zupčanika

Osnovi zahtjev prema materijalu iz kojeg će biti izrađeni zupčanici je podnošenje velikih opterećenje uz malo habanje. Materijali pogodni za izradu zupčanika su: legirani i termički obrađeni čelici, niskolegirani termički obrađeni čelici za manja opterećenja, sivi liv i čelični liv za mala opterećenja, mesing i Al-bronza za zupčanike manjih dimenzija, plastične mase za mala opterećenja,kombinacije različitih materijala u sprezi.

Osnovne karakteristike ozubljenja:

Da bi se osigurao konstantni prenosni odnos potrebno je da bokovi zuba budu tako izrađeni da osiguravaju stalan zahvat između dva zupčanika. Zupčanici se mogu posmatrati kao dva glatka cilindra koji se valjaju bez klizanja i oni predstavljaju kinematske cilindre na kojima su ustvari naneseni zubi. Površine valjanja ovih zamišljenih cilindara definisane su kinematskim kružnicama r_1 i r_2. Dvije kinematske kružnice se međusobno dodiruju u kinematskom polu *C*. Profil zuba treba zadovoljavati osnovni zakon ozubljenja koji traži da normala u trenutnoj tački dodira dvaju bokova zubaca prolazi kroz kinematski pol *C* (Slika 2.51).



a) b)

Slika 2.51. Osnovne mjere spregnutih zupčanika a) i mjere širine zuba b)

Osnovne mjere zupčanika

Sprezanje (zahvat) zupčanika moguć je samo ako zubi oba zupčanika imaju jednake osnovne mjere. Kombinacijom različitih brojeva zuba *z* postižu se različiti prenosni odnosi:

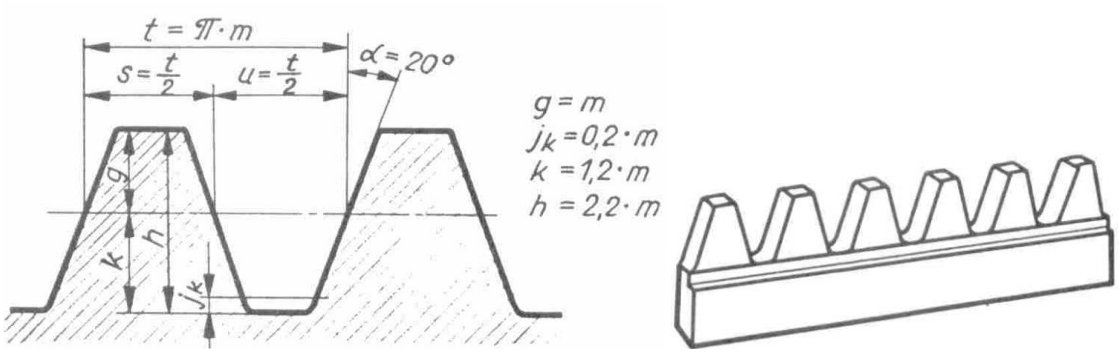
$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

Korak zuba *t* je lučni razmak tačaka presjeka okruglog profila dva susjedna zuba, gdje se luk definiše na kinematskoj kružnici D_1 (za zupčanik 1), odnosno D_2 (za zupčanik 2), dakle vrijedi da je:

$$t = \frac{D\pi}{z} = \frac{D_1\pi}{z_1} = \frac{D_2\pi}{z_2}$$

Za slučaj ozubljene letve (kinematska kružnica je pravac) korak zuba *t* se izražava preko modula zupčanika *m,* dok je širina zuba *s* jednaka polovini koraka *t.*

$$m = \frac{t}{\pi} \quad s = \frac{t}{2} = \frac{m\pi}{2}$$



Slika 2.52. Ozubljena letva (Decker, 1980)

Ugao dodirnice (tangente u dodirnoj tački) je kod evolventnog ozubljenja a = 20°. Visina zuba je (Slika 2.52):

$$h = k + g \quad g = m \; k = 1,2 \; m$$
$$h = 2,2 \; m$$

Podioni prečnik D_0 (Slika 2.51):

$$D_0 = m \, z$$

Tjemeni prečnik zuba (najveći prečnik kod vanjskog ozubljenja):

$$D_g = D_o + 2m$$

Dok je podnožni (korjenski) prečnik zuba:

$$D_k = D_o - 2,4m$$

Širina zupčanika *b* (faktor y kreće u rasponu y = 6 ÷100).

$$b = \psi \, m$$

Osni razmak zupčanika je:

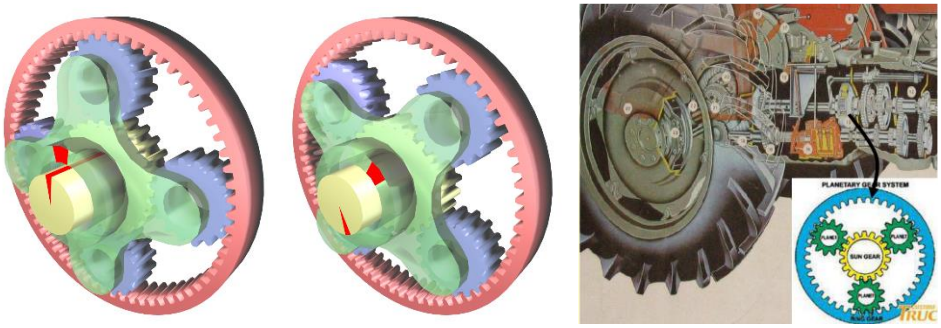
$$a = \frac{D_1 + D_2}{2} = m\frac{z_1 + z_2}{2} = D_1\frac{i+1}{2}$$

Da bi se dva zupčanika mogla spregnuti moraju da imaju *isti modul,* a to znači i isti korak.

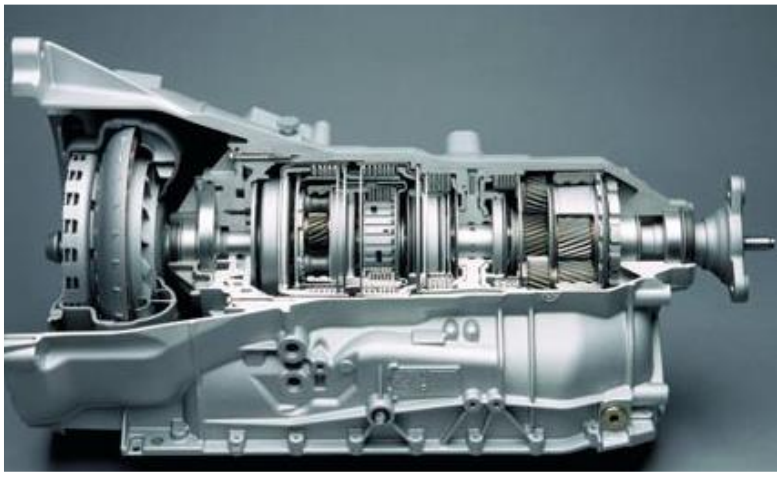
Zupčasti planetarni prenosnici – mogu biti sa jednim ili sa dva para zupčanika. Planetarni prenosni su malih gabarita i omogućavaju postizanje velikih stepena redukcije.

Planetni prenos je vrsta zupšastog prenosa kod koga se mehanički prenos ostvaruje tako da bar jedan član (planetni član) pored toga što rotira oko vklastite ose rotira oko još jedne ose. Glavne su mu karakteristike: veliki prenosni odnos, male dimenzije itd. U zavisnosti od izvedbe, sastoji se od više zupčanilka od kojih je bar jedan (srednji) nepomične geometrijske ose a jedan planetni.

Kao primer primjene se može navesti primjena planetarnog prenosnika u reduktoru traktora IMT (*i=4*), kao i u zadnjem točku traktora IMT (Slika 2.53).



Slika 2.53. Oblik planetnog prenosnika i primjer primjene kod traktora



Slika 2.54. Mjenjač BMW ZF6

Prednosti zupčastih prijenosnika: male dimenzije, veliki stepen korisnog djelovanja, konstantan prenosni odnos, velika izdržljivost, dug vijek trajanja. Nedostaci: visoka cijena izrade, velika krutost, veći šum u poređenju sa remenim prenosnicima.

2.3. Mašinski elementi obrtnog kretanja

Elementi obrtnog kretanja obuhvataju vratila, osovine i osovinice.

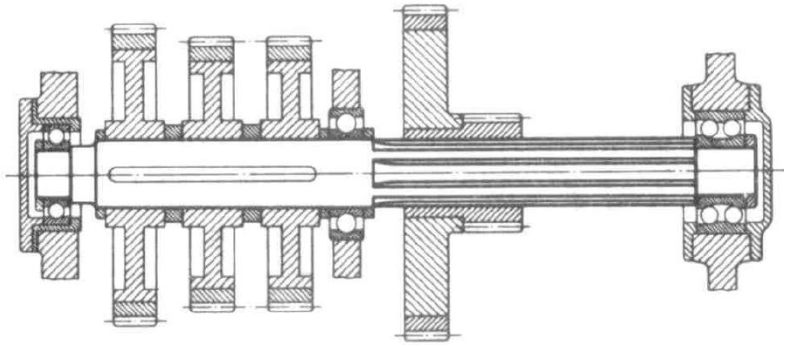
Vratila predstavljaju mašinske elemente čija je osnovna funkcija da služe kao nosači prenosnika, poput zupčanika, kaišnika ili lančanika, kao i drugih obrtnih dijelova mašina. Oni prenose obrtno kretanje ω (s^{-1}) i obrtni moment M (Nm), pri čemu su izloženi naprezanjima na uvijanje i savijanje. Pored toga, mogu biti izloženi i naprezanjima na sabijanje i istezanje (Slika 2.55).

Osovine (Slika 2.56) takođe prenose obrtno kretanje ω (s^{-1}), ali ne prenose obrtni moment, što znači da je M = 0. Osovine su uglavnom podložne naprezanju na savijanje.

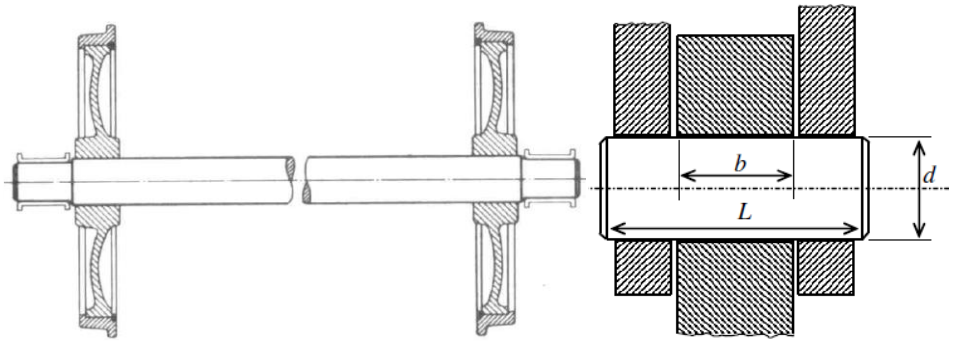
Osovinice ili svornjaci omogućavaju zglobnu vezu između dva mašinska dijela, omogućavajući njihovo obrtanje. Ovi elementi izloženi su naprezanju na savijanje i smicanje.

Osovine su nosači obrtnih dijelova mašina. Osovine ili miruju, tako da se na njima okreću mašinski dijelovi, ili pak rotiraju skupa sa mašinskim dijelovima (remenice, zupčanici, rotori i

sl. Vratila na sebi nose mašinske dijelove kao i osovine, ali se ovi dijelovi stalno okreću I prenose obrtni moment zajedno s vratilom.

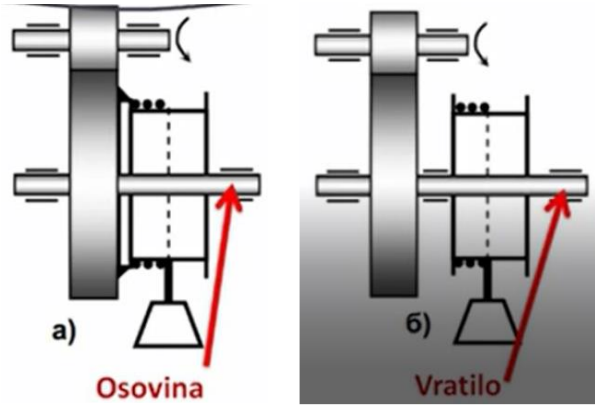


Slika 2.55. Vratilo (Decker, 1980)



a) b)

Slika 2.56. Osovina a) i osovinica b) (Decker, 1980)

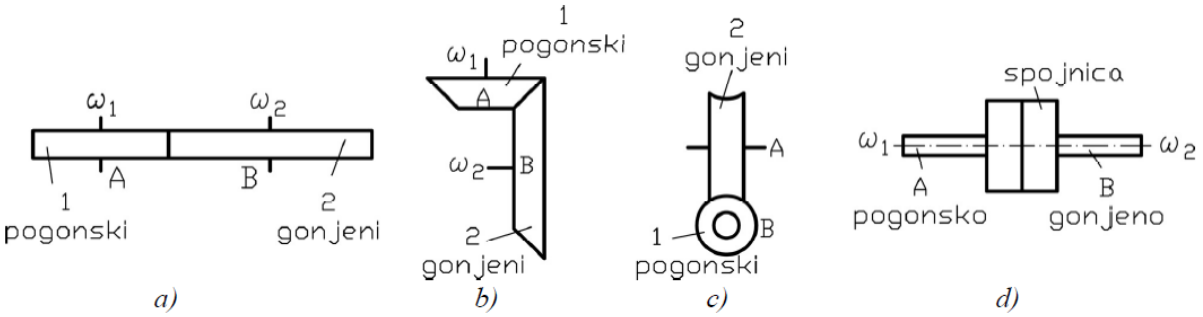


Slika 2.57. Razlika između osovine i vratila

2.3.1. Vratila

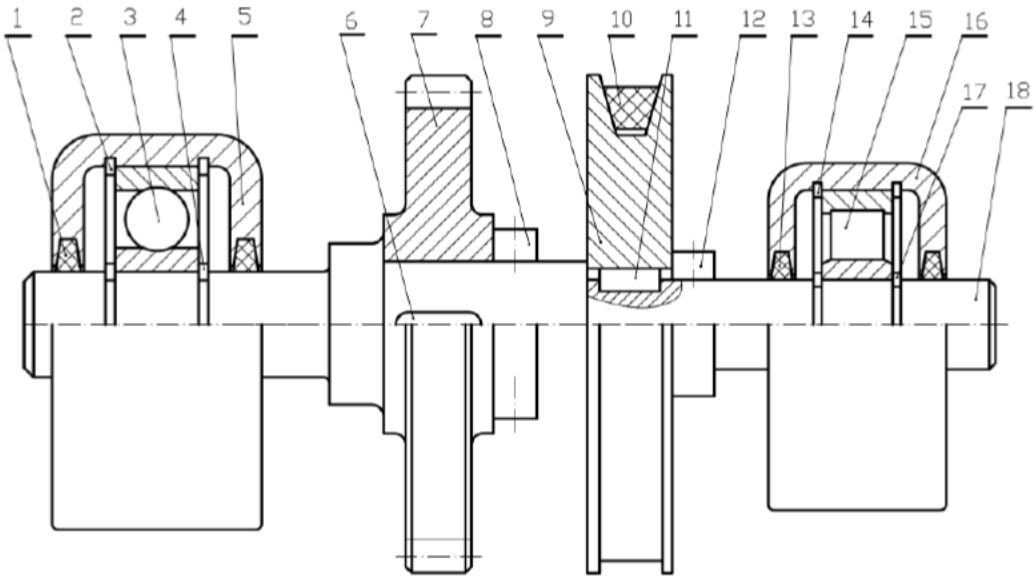
Vratila se obrću zajedno s prenosnicima i drugim obrtajućim dijelovima mašina koji su postavljeni na njima. Oslanjaju se na ležajeve koji trpe sile nastale kao posljedica prenosa obrtnog momenta i kretanja. Na vratilima se nalaze i spojnice koje omogućavaju povezivanje dva ili više vratila, omogućavajući prenos obrtnog momenta s jednog vratila na drugo. Funkcionalnost vratila ostvaruje se kada ono prenosi obrtni moment između dva vratila,

označena kao A i B. Ta vratila mogu biti međusobno postavljena paralelno (Slika 2.58a), mogu se sijecati (Slika 2.58b), mimoilaziti (Slika 2.58c) ili se nastavljati jedno na drugo (Slika 2.58d).

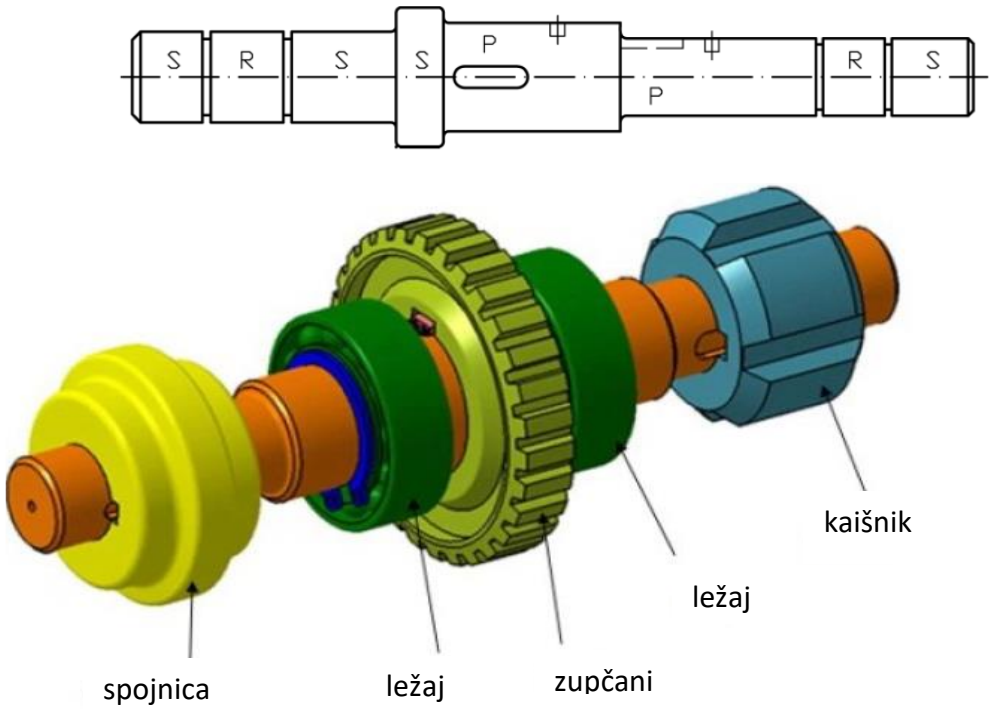


Slika 2.58. Prenos kretanja sa jednog vratila na drugo

Vratila se, prema konstrukcionom obliku, dijele na različite tipove: stepenasta, priključna, zglavkasta, teleskopska, koljenasta i gipka. Stepenasta vratila karakteristična su po tome što se na njima nalaze elementi za prenos snage, kao što su zupčanici, lančanici, kaišnici, frikcioni točkovi i varijatori. Takva vratila su izložena silama koje nastaju između prenosnika koji prenose različite obrtne momente, zbog čega njihovi poprečni presjeci variraju, a vratilo poprima stepenasti oblik. Na Slici 2.59. prikazano je stepenasto vratilo (Gligorić, 2020), na kojem su postavljeni cilindrični zupčanik (7) i remenica (9) sa remenom (10). Zupčanik i remenica povezani su s vratilom pomoću klinova (6) i (11), dok su od aksijalnog pomjeranja osigurani prstenovima i zavrtnjima (8 i 12). Vratilo (18) se oslanja na kotrljajne ležajeve sa kuglicama (3) i valjčićima (15). Ležajevi (3) i (15) smješteni su u kućišta (5) i (16), koja su zaptivena prstenovima (1) i (13). Prstenovi ležaja zaštićeni su od aksijalnog pomjeranja pomoću vanjskih (4 i 17) i unutrašnjih prstenastih uskočnika (2 i 14). Dijelovi vratila imaju specifične nazive prema svojoj funkciji: rukavci (R) su dijelovi na kojima se nalaze ležaji, podglavci (P) su dijelovi na kojima su smješteni prenosnici ili spojnice, dok se slobodnim dijelovima (S) smatraju oni dijelovi vratila na kojima nema dodatnih elemenata.

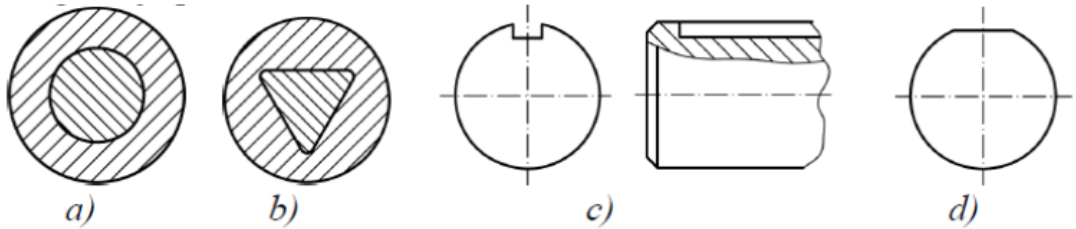


Slika 2.59. Vratilo sa prenosnicima i ležajima



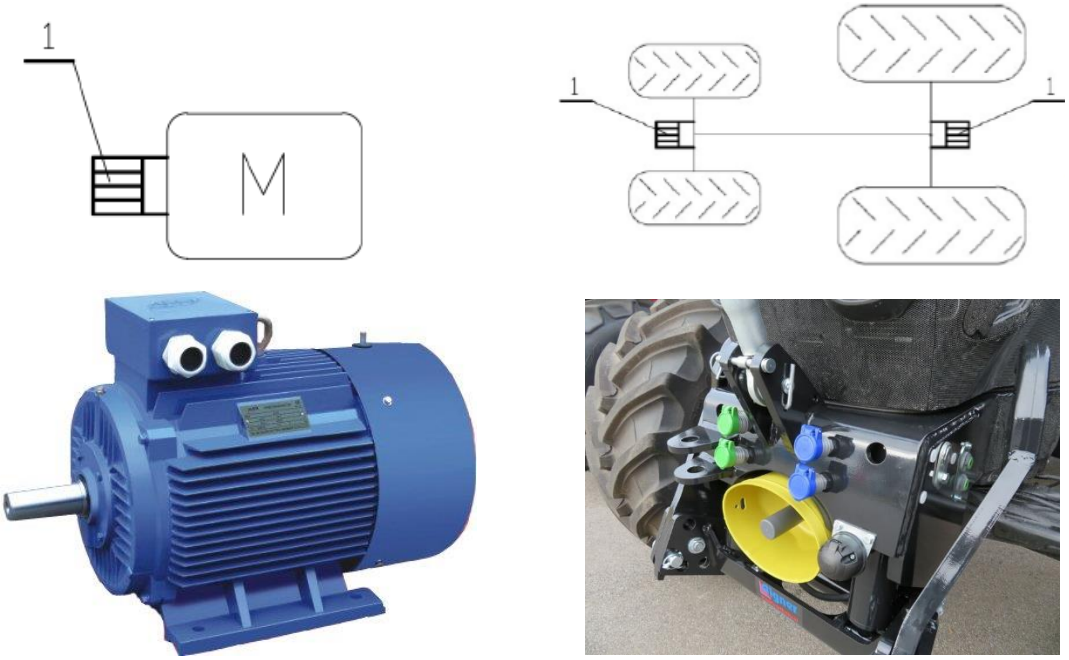
Slika 2.60. Stepenasto vratilo

Vratila su najčešće kružnog poprečnog presjeka (Slika 2.61a). Rijetko su nekog drugog oblika poprečnog presjeka, npr. trouglastog, zbog spoja sa glavčinom prenosnika (Slika 2.61b). Na vratilima se nalaze žljebovi za klinove kojima se vratila spajaju za glavčine prenosnika (Slika 2.61c). Umjesto žljeba za klin, vratilo može biti obrađeno po tetivi (Slika 2.61d).



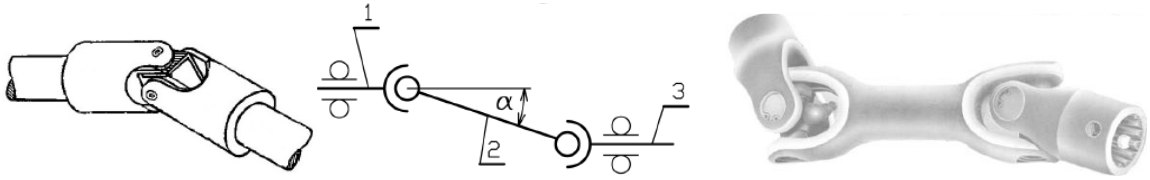
Slika 2.61. Poprečni presjek vratila i detalji na vratilima (Gligorić, 2020)

Priključno vratilo je ono vratilo na koje se priključuje neki prenosnik. Priključno vratilo je npr. izlazno vratilo elektromotora (Slika 2.62a) ili izlazno vratilo sa prednje i zadnje strane traktora (Slika 2.62b). Ovakva vratila su ožlebljena jer prenose velike obrtne momente.



Slika 2.62. Priključno vratilo

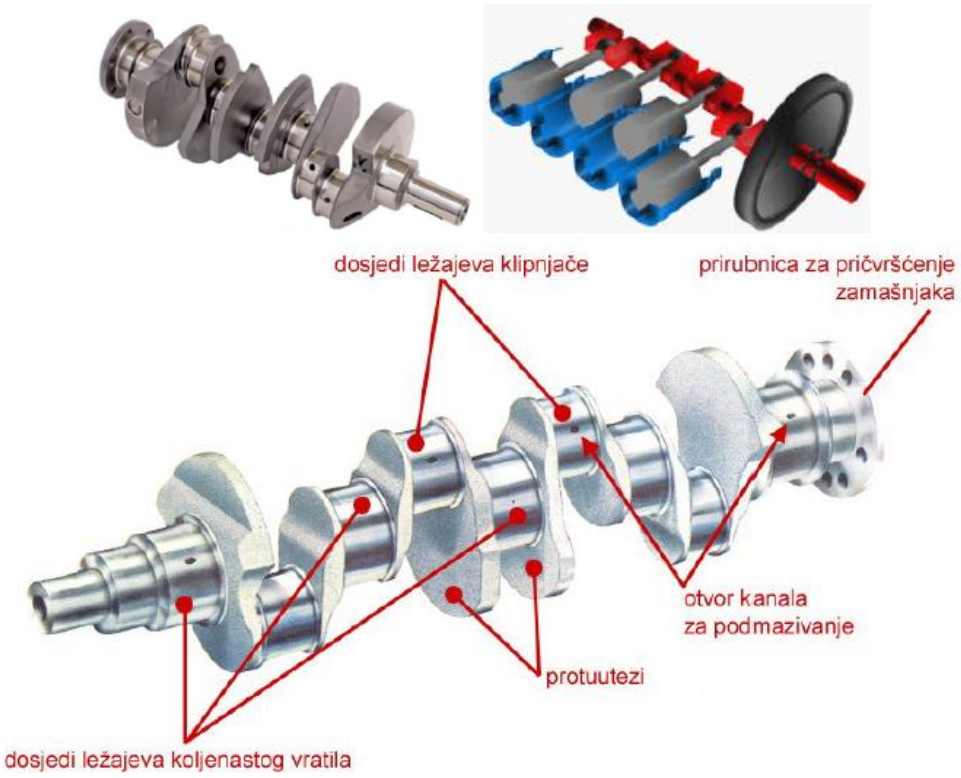
Zglobna vratila omogućavaju prenos kretanja između vratila koja nisu postavljena na istoj osi, već se sijeku pod određenim uglom α (Slika 2.63a). Među najpoznatijim zglobnim vratilima je kardansko vratilo, koje zahvaljujući zglobnim spojnicama prenosi obrtanje s pogonskog vratila (1) na gonjeno vratilo (3), pri čemu je ugao zakretanja α između njih. Ugao zakretanja α kod kardanskih vratila obično je ograničen na maksimalno 30°, jer veći uglovi mogu izazvati velike dinamičke sile koje mogu dovesti do loma vratila. Kardansko vratilo (Slika 2.63b) koristi se za prenos obrtnog momenta sa priključnog vratila traktora na priključne mašine koje imaju obrtne radne organe.



a) b)

Slika 2.63. Zglavkasto vratilo a), kardansko vratilo b)

Koljenasto vratilo ima izlomljenu osu simetrije (Slika 2.64). Koristi se kod klipnog mehanizma SUS motora. Koljenasto vratilo u SUS motoru je složen dio koji ima važnu ulogu u prenosu obrtnog momenta od motora do transmisije. Koljenasto vratilo zajedno sa klipnjačom transformiše pravolinijsko kretanje klipa u obrtno kretanje, koje se preko transmisionog uređaja koristi za pogon točkova radne mašine (traktora, kamiona, itd...). Rukavcima (dosjedima) se oslanja u ležištima.



Slika 2.64. Koljenasto vratilo (radilica)

Održavanje vratila sastoji se od:

- Održavanja vratila u čistom stanju. Za čišćenje vratila, kao i drugih mašinskih elemenata i dijelova na njemu, koristi se dizel gorivo.
- Zaštite od korozije koja se sastoji u podmazivanju odgovarajućim mazivima.

Oštećenja vratila **-** Najčešća oštećenja na vratilima su izazvana korozijom (Slika. 2.65). Pored toga vratilo (Slika. 2.65a) je smaknuto, a vratilo (Slika. 2.65b) je savijeno i smaknuto. Česta oštećenja na vratilima su habanje rukavaca za klizne ležajeve. (Slika. 2.65c).

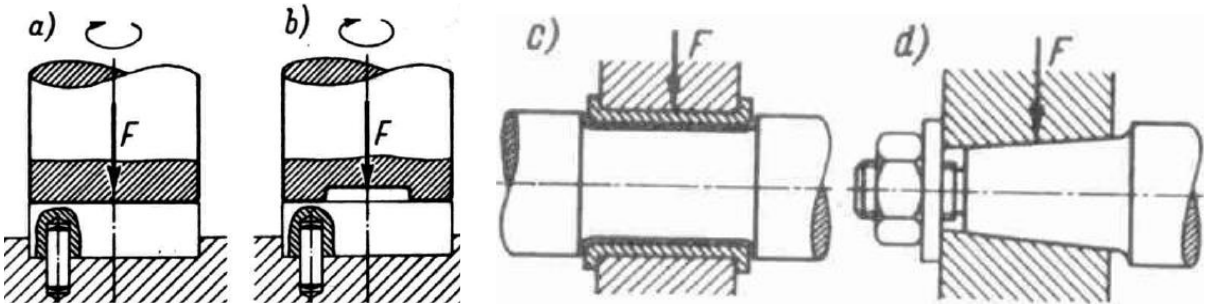


a) b) c)

Slika 2.65. Oštećenja na vratilima usljed korozije (Gligorić, 2020)

Rukavcima se nazivaju oni dijelovi osovina i vratila kojima se osovine i vratila oslanjaju na ležajeve.

Prema načinu prenošenja opterećenja, rukavaci mogu biti: aksijalni (Slika 2.66a i b) i radijalni (Slika 2.66c i d).



Slika 2.66. Aksijalni i radijalni rukavci (Decker, 1980)

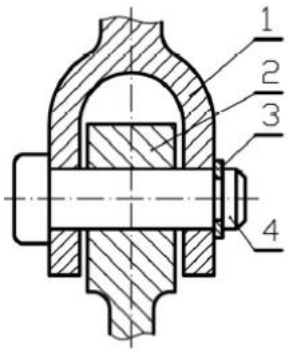
2.3.2. Osovine

Osovine su mašinski elementi koji svojim konstrukcionim oblikom podsjećaju na vratila, ali se razlikuju po funkciji, jer ne prenose obrtni moment, već samo obrtno kretanje (Slika 2.67). Njihova uloga je oslanjanje nepogonskih točkova, kao što su, na primjer, prednji točkovi traktora. Kada je prednja vuča uključena, riječ je o vratilima, dok su u suprotnom osovine. Osovine se široko primjenjuju kao nosači točkova na prikolicama, nosači različitih rotacionih elemenata poput doboša ili rotora. Mogu biti dizajnirane tako da se obrću zajedno s elementima koji se na njima nalaze ili da ostaju nepokretne, dok se elementi obrću u njima. Izložene su naprezanju na savijanje, smicanje i površinski pritisak. Obično imaju kružni poprečni presjek, iako mogu biti i kvadratnog, pravougaonog ili drugog oblika, zavisno od zahtjeva primjene.


Slika 2.67. Osovine za traktorsku prikolicu

2.3.3. Osovinice

To su osovine malih dužina koje se koriste za zglobno spajanje dijelova koji su međusobno pokretni. Koriste se za ostvarivanje zglobnih veza u kojima spojeni dijelovi imaju oscilatorno kretanje u odnosu na osovinicu i obrnuto (Slika 2.68.).



Slika 2.68. Osovinica (Gligorić, 2020)

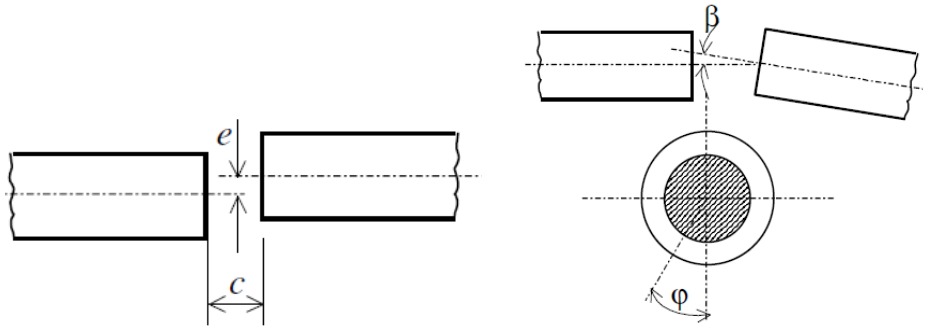
Viljuška (1) je zglobno povezana s dijelom (2) pomoću osovinice (4), koja je zaštićena od aksijalnog pomjeranja spoljnim prstenastim uskočnikom (3). Kako bi se omogućila zglobna pokretljivost, potrebno je da dodirne površine između dijelova (1) i (4) te dijelova (2) i (4) budu labavo prilagođene.Osovinice su izložene naprezanjima na savijanje, smicanje i površinski pritisak, što zahtijeva odgovarajuće dimenzionisanje i izbor materijala.

2.4. Mašinski elementi za oslanjanje i spajanje

U ovu grupu mašinskih elemenata ubrajaju se: spojnice, ležišta, ležajevi i kućišta.

2.4.1. Spojnice

Spojnice su mašinski elementi čija je funkcija spajanje vratila radi prenosa obrtnog momenta s jednog vratila na drugo, čime se oba vratila povezuju u jednu funkcionalnu cjelinu. Obično se postavljaju neposredno iza ležaja, što bliže izvoru energije. Konstrukcioni oblici i veličine spojnica standardizovani su prema nacionalnim i međunarodnim standardima, dok se u serijskoj proizvodnji izrađuju samo određeni tipovi spojnica. Pored osnovne funkcije povezivanja vratila, spojnice imaju zadatak da isprave netačnosti (Slika 2.69) koje mogu nastati između vratila. Takve netačnosti uključuju ekscentričnost (e), čeoni razmak (c), ugaono odstupanje osa (β) ili ugaono odstupanje u čeonoj ravni (ϕ).



Slika 2.69. Pojava netačnosti među vratilima

Podjela spojnica se može izvršiti prema različitim kriterijumima.

A) Podjela spojnica ***prema djelovanju*** je na:

1. Stalne i

2. Isključno-uključne koje se dijele prema načinu uključivanja na one koje se:

- Mogu se uključivati i isključivati kada su u stanju mirovanja.
- Omogućavaju uključivanje i isključivanje tokom rada.
- Mogu ih uključivati i isključivati ljudi.
- Takođe, postoje spojnice koje se automatski uključuju i isključuju, bez potrebe za ljudskom intervencijom.

Stalne spojnice su spojnice koje ostaju neprekidno uključene i kontinuirano prenose obrtni moment s jednog vratila na drugo. Uključno-isključne spojnice omogućavaju uključivanje i isključivanje, bilo tokom mirovanja ili tokom rada, koristeći odgovarajući aktivator ili mehanizam ugrađen u njihovu konstrukciju.

B) ***Prema načinu spajanja vratila***, spojnice se dijele na:

1. krute spojnice,
2. dilatacione (uzdužno pokretljive),
3. elastične (gipke),
4. neelastične (kompenzacione),
5. isključne- uključne,
6. specijalne i
7. sigurnosne.

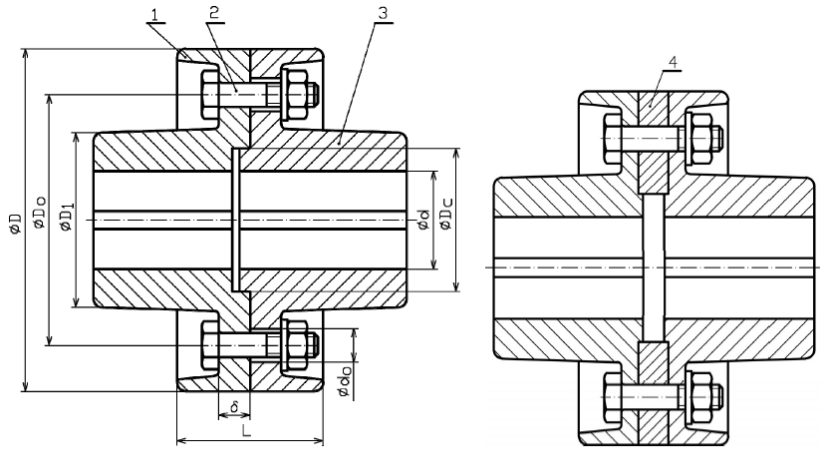
Na izbor spojnice utiču uslovi rada kao što je opterećenje, netačnost u izradi i sl.

2.4.1.1. Krute (čvrste) spojnice

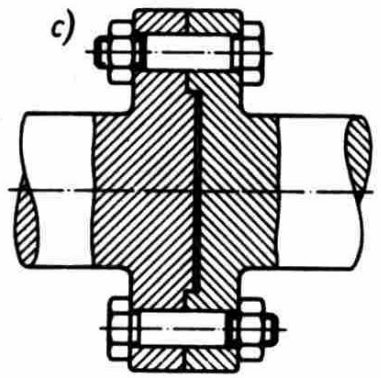
Ove spojnice uzdužno spajaju dva vratila kako bi se prenio obrtni moment. Za ove spojnice uvijek vrijedi pretpostavka da se ose vratila međusobno poklapaju. U suprotnom je potrebno izvršiti centriranje vratila. U ovu grupu se ubrajaju:

- Obodne (kolutne) spojnice: na krajevima vratila pričvršćuju se dva koluta iz sivog liva povezana perima za vratila. Koluti (obodi) imaju nastavke za centriranje, a dosjednim vijcima se prenosi obrtni moment (sika 2.70). Ova spojnica je namjenjena za kratka vratila koja su saosna. Ima više različitih konstrukcionih rješenja ove spojnice.
- Prirubne spojnice: krajevi vratila raskovani su u obliku prirubnica s nastavcima za centriranje. Spajanje se vrši dosjednim vijcima (sika 2.71).
- Školjkaste (ljuskaste, oklopne) spojnice: obrtni moment prenosi se silom trenja uz osiguranje perom (sika 2.72).

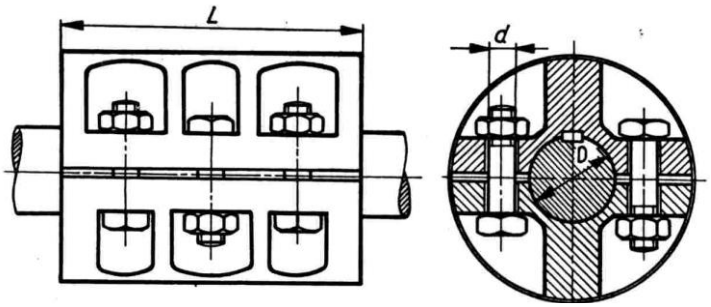
Za sve ove spojnice je karakteristično da imaju male ugradbene mjere.



Slika 2.70. Obodna spojnica (1-lijevi obod, 2-vijci, 3-desni obod, 4-prsten za centriranje)



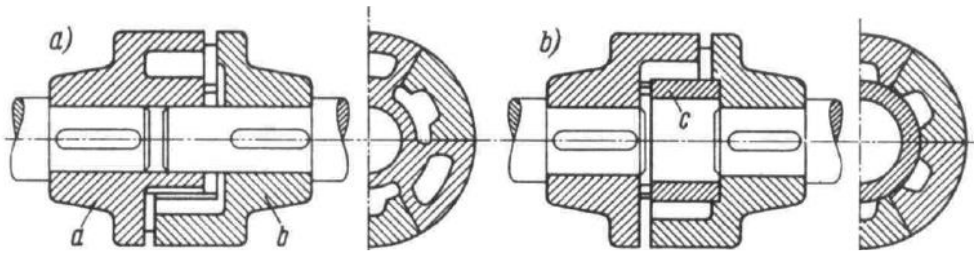
Slika 2.71. Prirubna spojnica



Slika 2.72. Oklopna (školjkasta) spojnica

2.4.1.2. Dilatacione (uzdužno pokretljive) spojnice

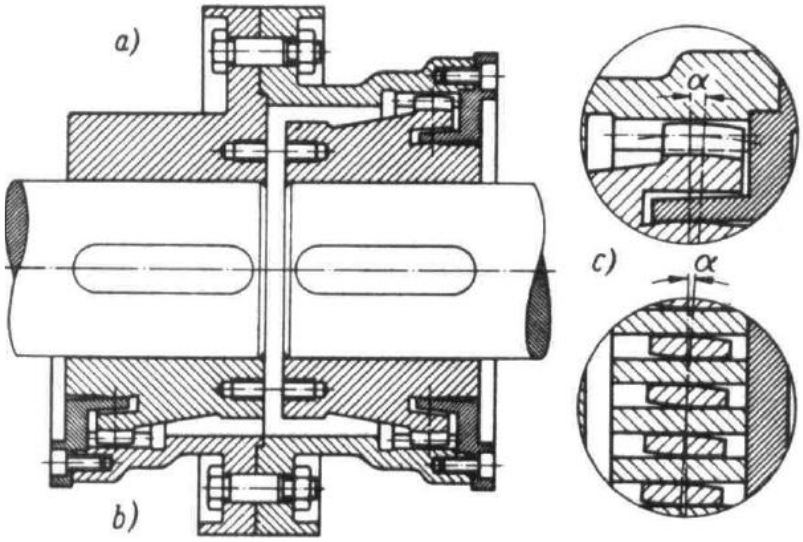
Ove spojnice koriste se za povezivanje dugačkih vratila koja su podložna znatnom izdužavanju usljed zagrijavanja, kao i za vratila koja osciluju u aksijalnom pravcu. Njihova osnovna funkcija je omogućavanje i kompenzacija dilatacija, odnosno aksijalnog pomjeranja vratila. Postoji više konstrukcionih rješenja ovih spojnica. Osim što omogućavaju uzdužne dilatacije, ove spojnice istovremeno obavljaju aksijalno i radijalno centriranje vratila. U ovu kategoriju spadaju kandžaste spojnice, koje se izrađuju u dvodijelnoj (Slika 2.73a) i trodijelnoj izvedbi (Slika 2.73b).



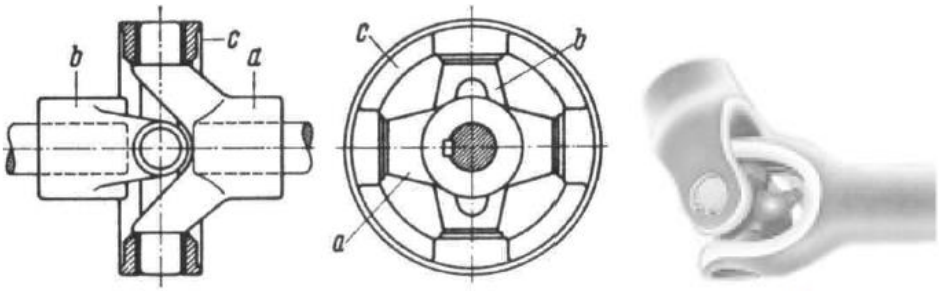
Slika 2.73. Kandžaste dvodjelne a) i trodjelne b) spojnice (Decker, 1980)

2.4.1.3. Neelastične kompenzacione spojnice

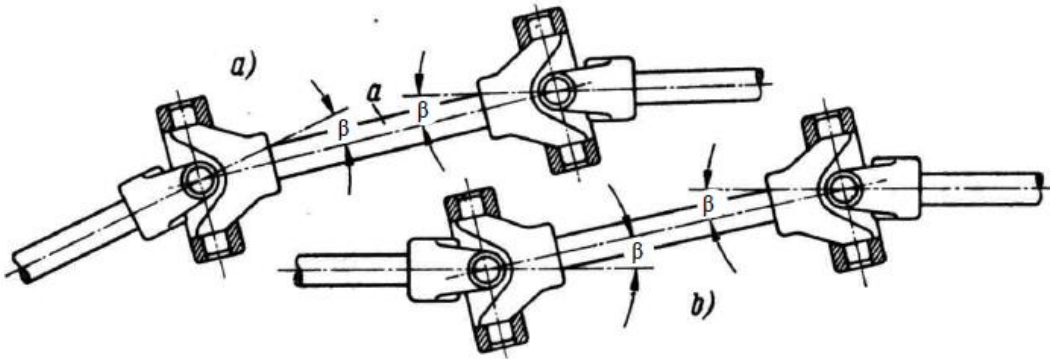
U slučaju kada je uz aksijale dilatacije potrebno kompenziovati i ugaono odstupanje ose β, koriste se zupčaste spojnice sa lučnim zubima (Slika 2.74) kod kojih je, uz aksijalni pomak, moguće ostvariti i ugaono odstupanje od α=1°. Ugaono odstupanje do β= 15^0 je moguće ostvariti kardanskim spojnicama (spojnica sa krstastim zglobom) (Slika 2.75). Kod kardanskih spojnica u kombinaciji s međuvratilom moguće je ostvariti ugaona odstupanja do β = 30^0, odnosno ostvariti prenos između paralelnih vratila s ekscentričnim osama (Slika 2.76). Ukoliko se međuvratilo izvede teleskopski, moguće je kompenzovati i aksijalne dilatacije (Slika 2.77).



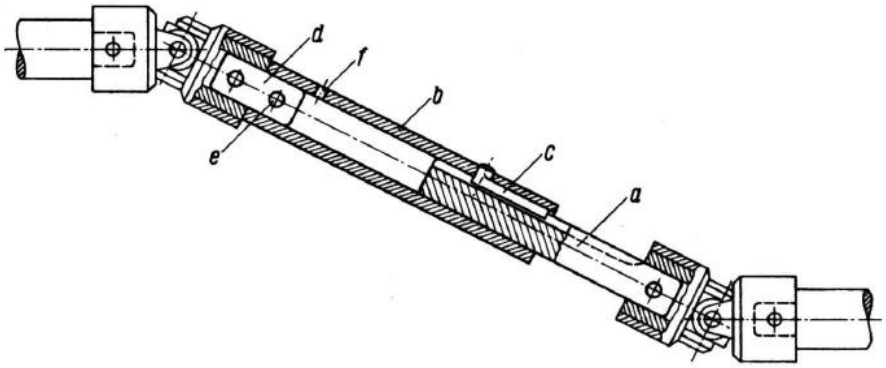
Slika 2.74. Zupčasta spojnica sa lučnim zubima (Decker, 1980)



Slika 2.75. Kardan-Hukova spojnica



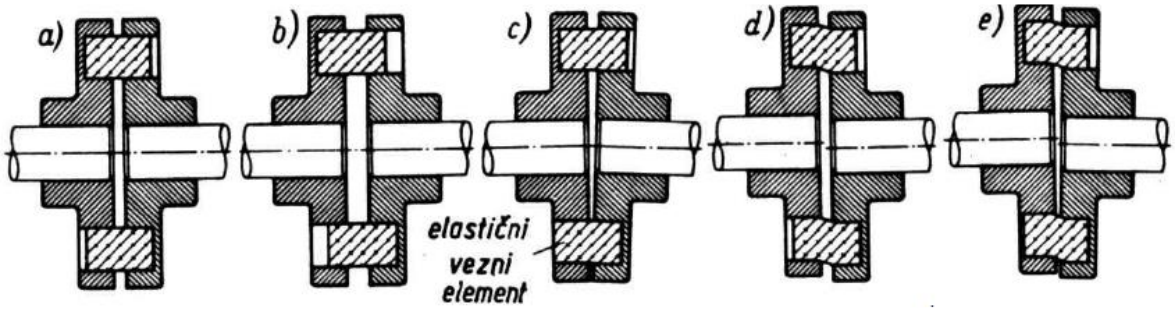
Slika 2.76. Kardanove spojnice sa međuvratilom (Decker, 1980)



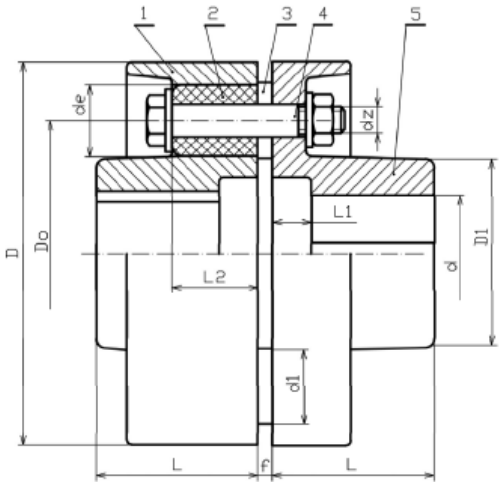
Slika 2.77. Kardanove spojnice sa teleskopskim vratilom (Decker, 1980)

2.4.1.4. Elastične spojnice

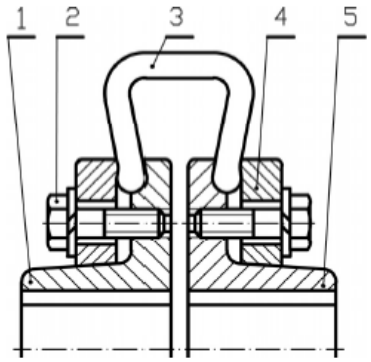
Spojnice ovog tipa omogućavaju kompenzaciju svih potencijalnih odstupanja koja se mogu pojaviti između vratila (Slika 2.78). Osim toga, elastične spojnice apsorbuju i promjene obrtnog momenta, kao i torzione udare. Između dvije metalne ploče spojnice nalaze se elastični elementi izrađeni od materijala kao što su guma, koža, sintetičke mase, tekstilne tkanine, čelične opruge i slični materijali. Najčešće su u upotrebi izvedbe s gumom, jer se odlikuju jednostavnom proizvodnjom koja se zasniva na vulkanizaciji gumene mase na čelične ploče.



Slika 2.78. Kompenzacija netačnosti sa elastičnom spojnicom (Decker, 1980)



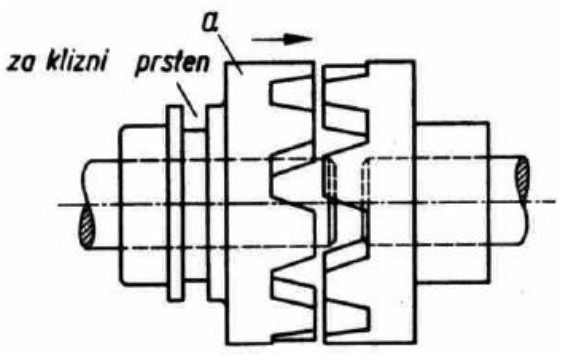
Slika 2.79. Elastična spojnica sa obodima, 1. lijevi obod spojnice, 2. elastični uložak, 3. odstojna pločica, 4. vijak, 5. desni obod spojnice (Gligorić, 2020)



Slika 2.80. Perifleks spojnica – elastična: 1. lijevi obod, 2. vijak, 3. elastični prsten, 4. spojni dio, 5. desni obod (Gligorić, 2020)

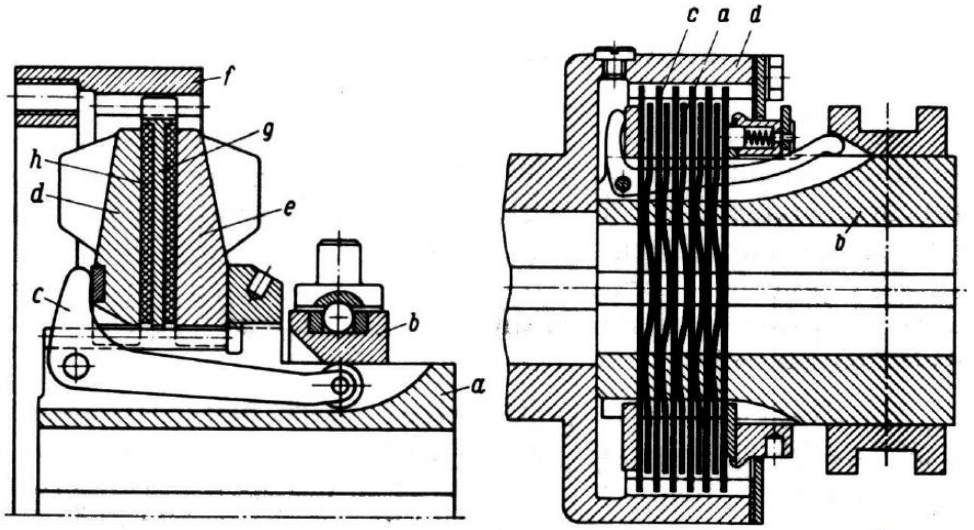
2.4.1.5. Isključno-uključne spojnice

Ove spojnice omogućavaju kontrolisano (putem poluge) uključivanje i isključivanje vratila koja povezuju (npr. automobilski i slični pogoni). Najjednostavnija je isključna kandžasta spojnica koja omogućava isključivanje vratila i njegovo uključivanje, ali samo pri mirovanju oba vratila (Slika 2.81).

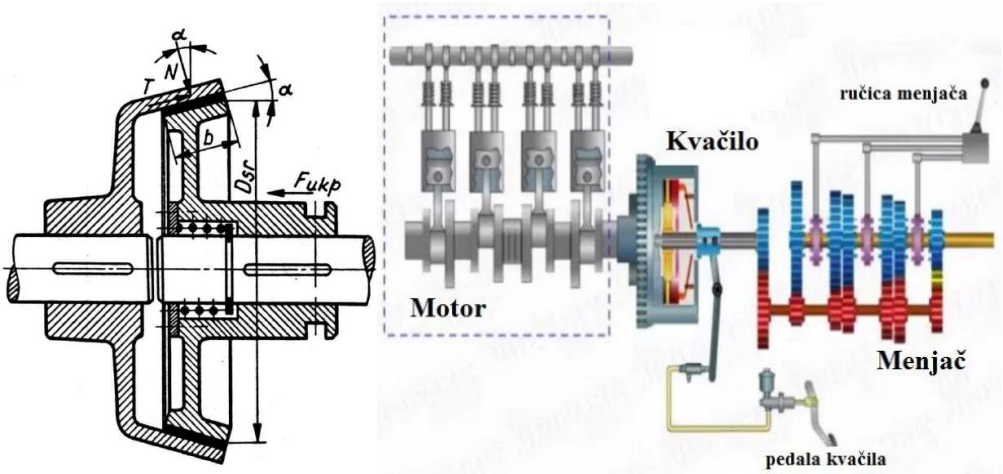


Slika 2.81. Kandžasta isključna spojnica

Kod reduktora, kada je potrebno razdvojiti reduktor od vratila ili promijeniti prijenosne odnose zupčanika (spajanjem različitih zupčanika), koriste se frikcione (tarne) spojnice s jednom frikcionom pločom ili višelamelne spojnice (Slika 2.82). Spojnica s jednom frikcionom pločom može se izvesti i u koničnom obliku (Slika 2.83), što omogućava prenošenje većih obrtnog momenta. Uključivanje i isključivanje frikcionih spojnica može se obavljati i tokom rotacije vratila. Frikcione spojnice dijele se na normalno uključene (kao što su automobilske spojnice) i normalno isključene. Zbog trenja koje nastaje prilikom uključivanja i isključivanja, uslijed različitih brzina diskova, lamele ovih spojnica podložne su intenzivnom trošenju. Da bi se smanjilo habanje, koriste se frikcione obloge koje se mijenjaju zajedno s lamelama kada dođe do njihovog istrošenja.



Slika 2.82. Frikciona spojnica sa jednom frikcionom pločom (lijevo) i lamelarna frikciona spojnica (desno)



Slika 2.83. Frikciona spojnica sa koničnim dodirom površina (lijevo) i kvačilo (desno)

Centrifugalne spojnice, poznate i kao automatske ili uključno-isključne spojnice, služe za povezivanje dva vratila pri postizanju određene brzine rotacije. Njihova primjena je najčešća kod povezivanja vratila elektromotora s vratilom radne mašine. Motor se pokreće bez opterećenja, a tek nakon dostizanja odgovarajućeg broja obrtaja, spojnica aktivira spoj između priključnog vratila motora i vratila radne mašine. Ovo se postiže djelovanjem centrifugalne sile koja razmiče i povezuje obode spojnice (Slika 2.84).

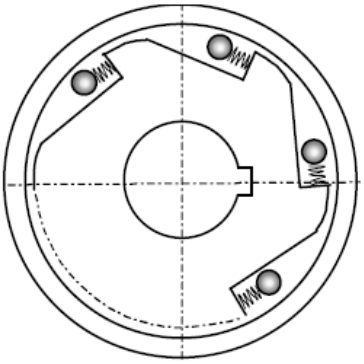


Slika 2.84. Automatska frikciona centrifugalna spojnica sa postepenim uključivanjem/isključivanjem kod motorne testere

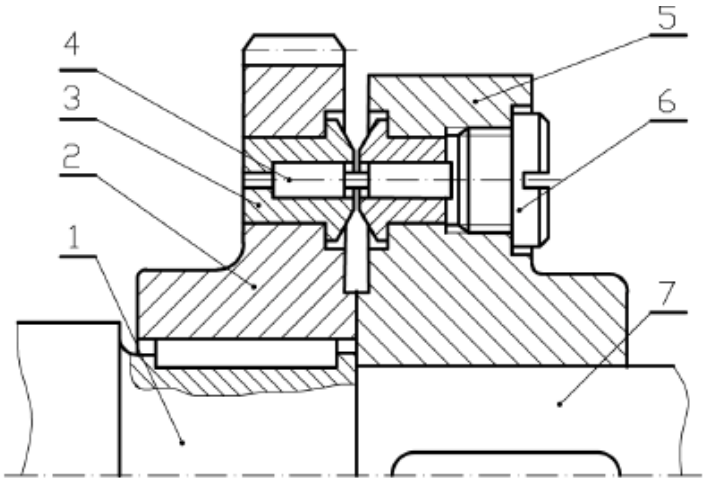
2.4.1.6. Specijalne spojnice

U ovu grupu spojnica ubrajaju se:

- Jednosmjerne spojnice: prenose obrtni moment samo u jednom smjeru (npr. Točak bicikla) (slika 2.85).
- Sigurnosne spojnice: u slučaju prekoračenja obrtnog momenta vrše razdvajanje vratila (slika 2.86).
- Spojnice za puštanje u rad.



Slika 2.85. Jednosmjerna spojnica



Slika 2.86. Sigurnosna spojnica sa aksijalno postavljenom čivijom: obodi (2) i (5) koji su spojeni sigurnosnom čivijom (4) koja se nalazi u kaljenim čaurama (3), a od ispadanja obezbjeđena je vijkom (6).

Sigurnosne spojnice, osim osnovne funkcije spajanja vratila, imaju ključnu ulogu u zaštiti pogonskog vratila od preopterećenja. Kada dođe do preopterećenja gonjenog vratila, sigurnosna spojnica automatski prekida vezu između dva vratila, pri čemu se tok energije i kretanja zaustavlja bez potrebe za intervencijom rukovaoca ili dodatnog mehanizma izvan spojnice. Pored toga, pojedini tipovi sigurnosnih spojnica imaju funkciju signalizacije prekida prenosa kretanja s pogonskog na gonjeno vratilo. Signalizacija prekida ostvaruje se proklizavanjem dijelova spojnice, što stvara karakterističan prodoran zvuk, čime se rukovalac obavještava o prekidu. Sigurnosne spojnice se ugrađuju što bliže dijelovima gdje se očekuje preopterećenje, čime se minimizira rizik od oštećenja. Primjena sigurnosnih spojnica uključuje sljedeće situacije:

- Kod mašina podložnih nepredvidivim preopterećenjima (udarima), kao što su mašine za krčenje terena, uređaji za rad u kamenitom zemljištu, vitla i slični strojevi.
- Kod mašina koje obrađuju nehomogene materijale, uključujući zemljište, biljnu masu i druge nepravilne strukture. Ovo obuhvata šumarske, poljoprivredne, građevinske, meliorativne i rudarske mašine.
- Kod mašina koje nisu pod stalnim nadzorom čovjeka, poput uređaja u tehnološkim linijama.
- Kod osjetljivih i preciznih mehanizama gdje bi preopterećenje moglo izazvati netačan rad ili ozbiljna oštećenja.

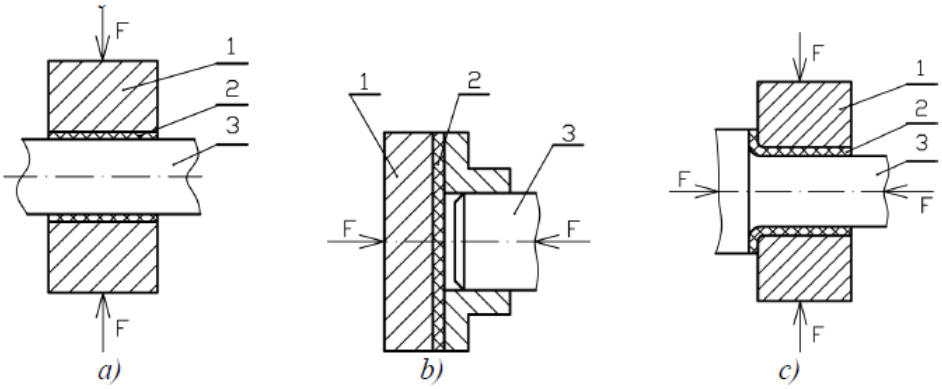


Slika 2.87. Različite spojnice

2.4.2. Ležišta i ležaji

Ležaji imaju ključnu ulogu u prenošenju opterećenja s pokretnih dijelova mašina, poput vratila i osovina, na njihove nepokretne dijelove, poput kućišta. Klizni ležaji se koriste za prenos

opterećenja kod translatornog kretanja, dok kotrljajući ležaji preuzimaju opterećenje pri obrtnom kretanju. Ležišta (klizni ležaji) i ležaji (kotrljajući ležaji) predstavljaju mašinske elemente koji služe za oslanjanje vratila i osovina, omogućavajući formiranje pokretnih spojeva. Ovi elementi podnose sile koje djeluju na vratila, osovine ili same spojeve. Da bi se osigurala adekvatna zaštita i podmazivanje, ležaji i ležišta smještaju se unutar zatvorenih kućišta. Klizni ležaji karakterišu se prisustvom trenja klizanja, dok kod kotrljajućih ležaja dolazi do trenja kotrljanja. Budući da je trenje kotrljanja znatno manje od trenja klizanja, kotrljajući ležaji imaju širu primjenu u različitim vrstama mašina. Prema opterećenju, ležišta i ležaji se dele na: radijalna (Slika 2.88a), aksijalna (Slika 2.88b), i radijalno-aksijalna, (Slika 2.88c).



Slika 2.88. Klizni ležaji-ležišta, 1-kućište ležaja, 2-posteljica, 3-vratilo (Gligorić, 2020; Ognjanović et al., 1991)

2.4.2.1. Ležišta

Klizni ležaji se koriste tamo gdje primjena kotrljajućih ležaja nije moguća. Najčešće su primjenjivi kod preuzimanja velikih snaga (npr. brodske mašine, turbine) ili gdje je potreban miran rad (alatne mašine). Njihova primjena obuhvata:

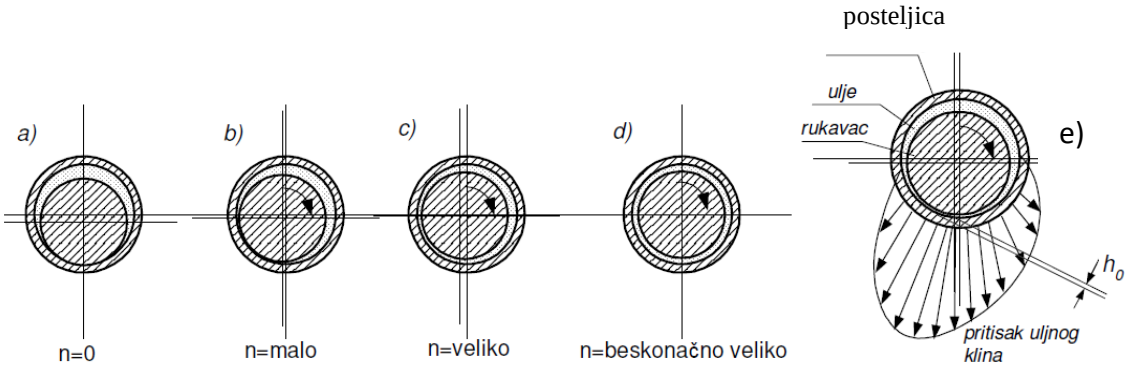
1. Sklopove gdje bi kotrljajući ležaji izazvali vibracije i buku.
2. Rukavce prečnika <15 mm i >300 mm, jer su kotrljajući ležaji tih dimenzija rijetki.
3. Nepristupačna mjesta, gdje se ugrađuju uzdužno rasječena klizna ležišta (npr. rukavci radilica).

Prednosti: jednostavna konstrukcija, mala osjetljivost na udare, pogodnost za velike brzine.
Nedostaci: veće trenje, potrošnja maziva i zagrijavanje u odnosu na kotrljajuće ležaje.

Ležišta ili klizni ležaji su svi klizni pokretni spojevi. Osnovni dio ležišta je tanak sloj antifrikcionog materijala koji se naziva posteljica (Slika 2.88, poz. 2) i koji ima mali koeficijent trenja. Između vratila (3) i ležišta (2) treba da je dovoljan zazor u kojem se nalazi mazivo. Ležište (2) je smješteno u kućištu (1) koje može biti standardnog i nestandardnog oblika.

Vratilo se rotira dok ležište i kućište ostaju nepomični, pri čemu se javlja trenje klizanja između posteljice i rukavca. Rukavci su podmazani uljem ili mastima, što omogućava stvaranje hidrodinamičkog podmazivanja – rukavci "plivaju" na tankom sloju maziva.

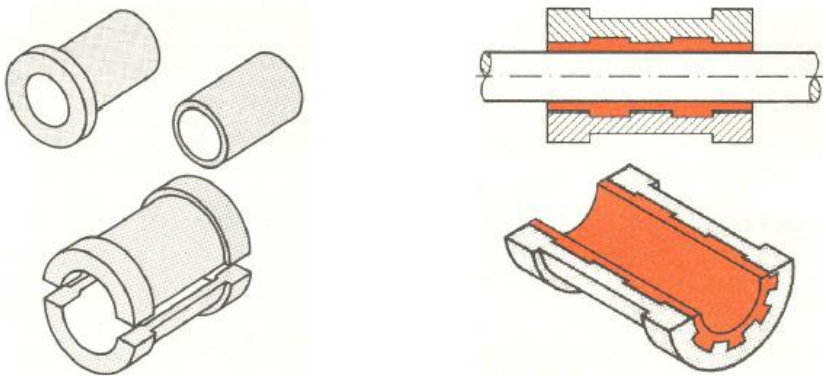
Prilikom pokretanja vratila prvo dolazi do pojave suvog trenja, koje zatim prelazi u mješovito, a na kraju u tekuće trenje. Suvo i mješovito trenje je potrebno svesti na minimum, jer negativno utiče na efikasnost i trajnost sistema. Stoga je ključno što prije dostići stanje tekućeg trenja.



Slika 2. 89. Položaj rukavca kod raznih brzina obrtanja

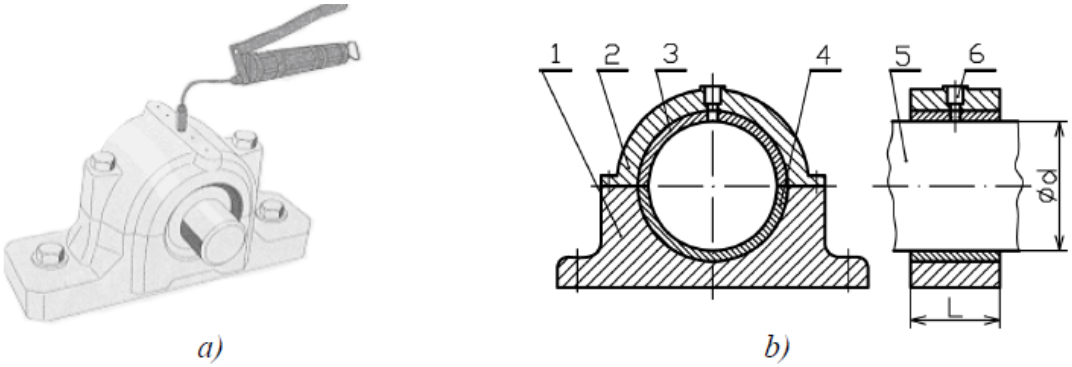
Na Slici 2.89. prikazan je način nastajanja nosivog uljnog sloja u ležaju. U početku rukavac leži ekscentrično u posteljici (Slika 2.89a). Kada se rukavac započne okretati (Slika 2.89b), dolazi do mješovitog trenja, nastaje uljni klin te rukavac svojom rotacijom utiskuje ulje u klinasti međuprostor. Daljnjim povećanjem brzine obrtanja, povećava se pritisak i rukavac "zapliva" na uljnom klinu, čime dolazi do tekućeg trenja (hidrodinamičko podmazivanje). Daljim povećanjem brzine obrtanja i pritiska između rukavca i posteljice, ekscentricitet se sve više smanjuje i za beskonačno veliku brzinu obrtanja taj bi ekcentricitet teoretski nestao (Slika 2.89d). Raspodjela pritiska prikazana je na Slici 2.89e.

Ležište je zapravo samo onaj tanak prsten koji se naziva posteljica i koja se nalazi u kućištu. Posteljica može biti jednodjelna i dvodjelna (Slika 2.90). Dvodjelna posteljica je jednostavnija za montažu.



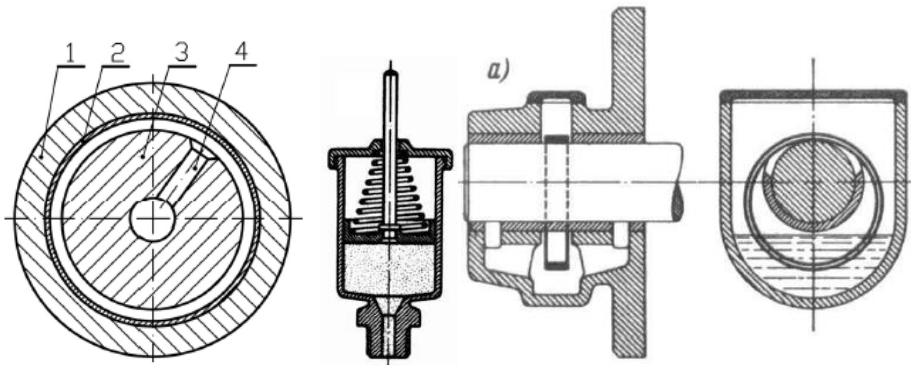
Slika 2.90. Posteljica ležišta (Gligorić, 2020)

Ležište (posteljica) se nalazi u kućištu (Slika 2.91.a) koje može biti jednodjelno ili dvodjelno (Slika 2.91b).



Slika 2.91. Podmazivanje ležišta: 1. donji dio kućišta, 2. gornji dio kućišta, 3. gornji dio posteljice, 4. donji dio posteljice, 5. vratilo, 6. otvor za podmazivanje (Gligorić, 2020)

Podmazivanje ležišta je obavezno i postiže se na različite načine, povremeno ili stalno. Za povremeno podmazivanje koriste se uređaji za podmazivanje (Slika 2.91) pomoću kojih se kroz otvor (6) pomoću mazalice, utiskuje mazivo kroz kućište i posteljicu, tako da dopire u proctor između rukavca i posteljice. Kućište u kojem se nalazi posteljica (3) i (4) je najčešće dvodjelno, odnosno višedjelno.

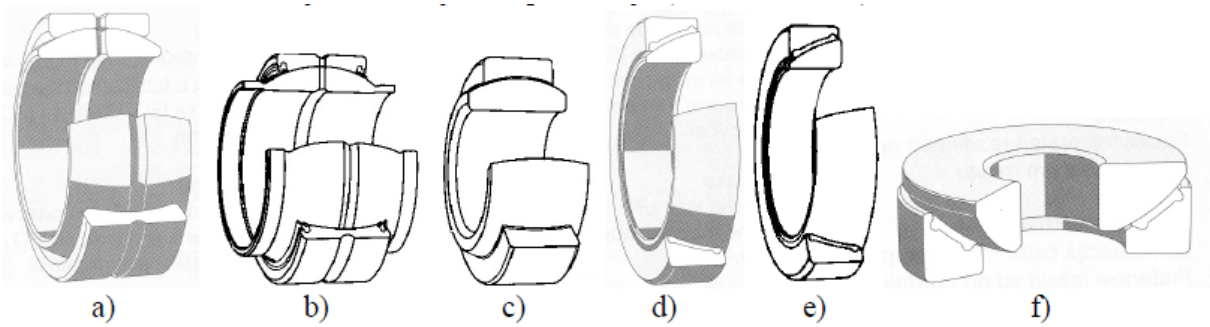


Slika 2.92. Podmazivanje ležišta a) 1. kućište, 2. posteljica, 3. vratilo, 4. kanal, mazalica sa oprugom b), podmazivanje sa prstenom za podmazivanje c), (Decker, 1980)

Koriste se dvije vrste maziva i to:

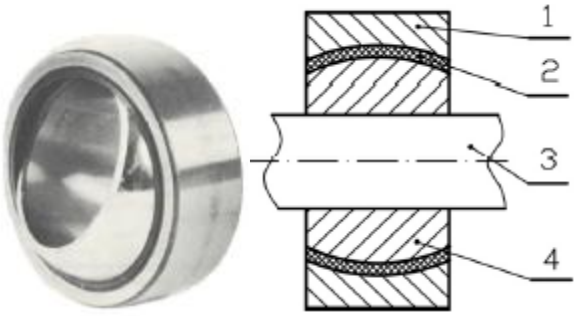
- Masti: omogućavaju jeftino podmazivanje niskoopterećenih, sporednih ležajeva. Mast se, najčešće putem mazalica (slika 2.92b), uvodi pod pritiskom u kanale koji su spojeni sa ležajnim mjestima.
- Ulja: koriste se kod brzohodnih ležajeva i velikih opterećenja. Podmazivanje se vrši ručno kod sporednih ležajeva, pomoću pumpnih agregata za podmazivanje više ležajeva te uranjanjem (mazivim prstenom), čime se omogućava jednostavno i jeftino podmazivanje (slika 2.92c).

Ležišta su uglavnom cilindrična, a mogu biti i drugih konstrukcionih oblika, npr. sferna. Sferni klizni ležaji se koriste za kompenzaciju nesaosnosti vratila i otvora ležaja. Mogu biti sferni za radijalna opterećenja, dvodjelni (Slika 2.93 a i b) i jednodelni (Slika 2.93c). Sferni klizni ležaji sa kosim dodirom koriste se za radijalna i aksijalna opterećenja (Slika 2.93 d, e i f).



Slika 2.93. Sferni klizni ležaji

Samopodesivo ležište omogućava radijalna zakretanja vratila (Slika 2.94), što je značajno kod dugih vratila sklonih ugibu i oscilacijama, kao kod poljoprivrednih mašina. Unutrašnji prsten (4) čvrsto naliježe na vratilo (3) i rotira zajedno s njim, dok spoljašnji prsten (1) ostaje nepomičan unutar kućišta. Između prstenova nalazi se klizni ležaj – posteljica (2). Sferni oblik prstenova omogućava zakretanje unutrašnjeg prstena i vratila (3) u odnosu na spoljašnji prsten (1) i kućište, čime se kompenzuju deformacije i oscilacije vratila.



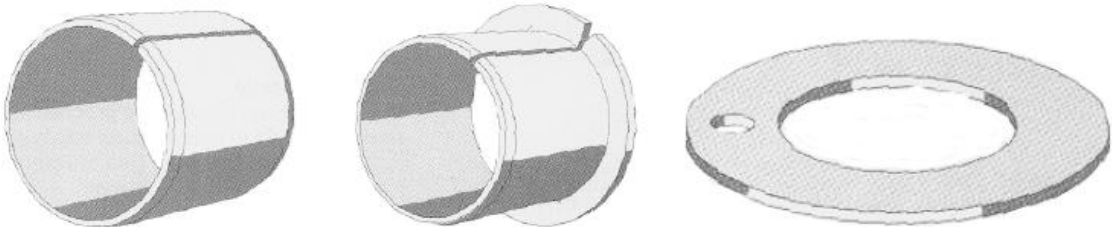
Slika 2.94. Samopodesivo ležište, 1. spoljašnji prsten ležišta, 2. posteljica, 3. vratilo, 4. unutrašnji prsten ležišta (Gligorić, 2020)

Zahtjevi koje treba ispuniti materijal kliznog ležaja od kojih se izrađuju posteljice su:

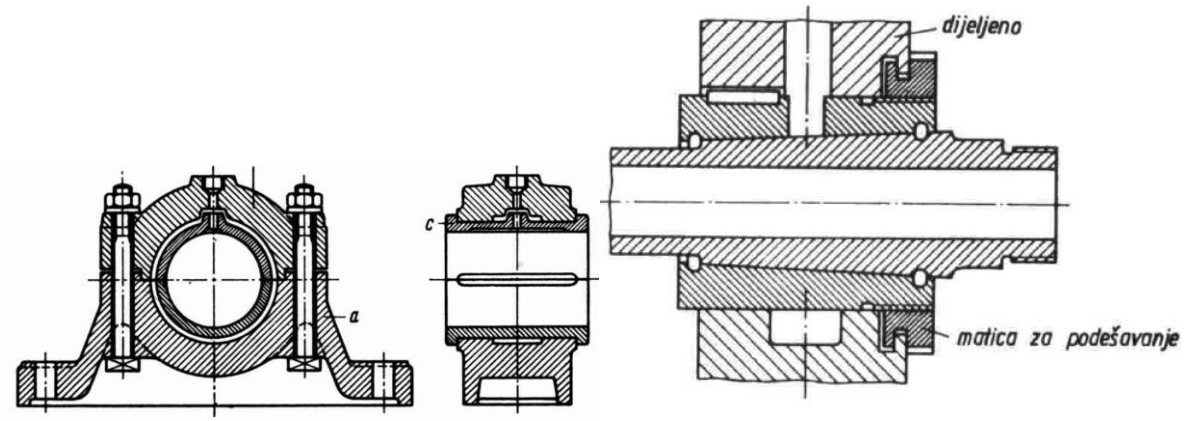
- Mora biti mekši od materijala rukavca pošto je popravak rukavaca skuplji,
- Treba biti otporan prema habanju,
- Da ima velika čvrstoća na pritisak,
- Da je neosjetljiv prema zaribavanju,
- Da ima dobru toplotnu provodljivost,
- Da ima dobru sposobnost uhodavanja,
- Da ima dobru sposobnost klizanja pri nepovoljnom podmazivanju i pokretanju.

Da bi se smanjilo trenje klizanja, za izradu ležišta koriste se materijali s niskim koeficijentom trenja klizanja, uz primjenu različitih vrsta maziva. Posteljice se najčešće izrađuju od legura na bazi kalaja, olova, bakra, aluminijuma, antimona, cinka i drugih metala. Najpoznatija legura za posteljice je bijeli metal, čiji je sastav definisan standardima. U upotrebi su i sivi liv, olovne i aluminijumske bronze, sinter metali, metalokeramički materijali, plastične mase, guma i slični materijali. Na teško dostupnim mjestima, gdje podmazivanje nije praktično, koriste se samopodmazujući materijali za izradu posteljica. Ove posteljice se izrađuju od čelika

presvučenog kalajnom bronzom, s dodatnim slojem acetatne smole debljine 0,3 mm (Slika 2.95). U sloju smole nalaze se džepovi koji se tokom montaže pune mašću, čime se osigurava trajno podmazivanje.



Slika 2.95. Samopodmazujući klizni ležaji (posteljice) (Gligorić, 2020)

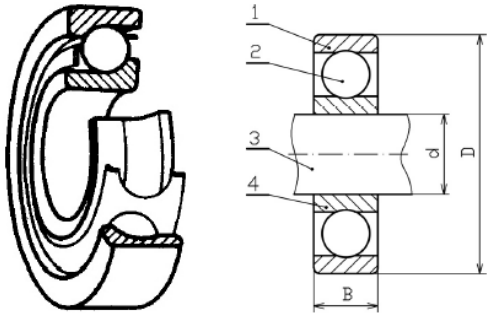


a) b)

Slika 2.96. Dvodjelni radijalni klizni ležaj a), podesivi konusni klizni ležaj b) (Decker, 1980)

2.4.2.2. Ležaji

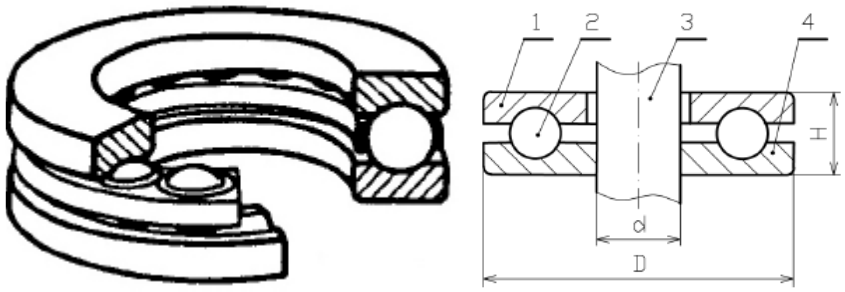
Ležaji se prvenstveno koriste za pokretne veze sa kružnim kretanjem, a u manjoj mjeri i za spojeve sa pravolinijskim i zavojnim kretanjem. Ležaji (kotrljajući ležaji) su takvi ležaji kod kojih se između obrtnih dijelova javlja trenje kotrljanja koje je daleko manje od trenja klizanja (f«μ). Osnovni dijelovi kotrljajnih ležaja su unutrašnji prsten (Slika 2.97 poz. 4), spoljašnji prsten (1) i kotrljajući elementi (2).



Slika 2.97. Kotrljajni prstenasti ležaj: 1. spoljašnji prsten, 2. kotrljajuće tijelo – kuglica, 3. rukavac 4. unutrašnji prsten

Ležaj ovog tipa naziva se prstenasti ležaj i koristi se za prenošenje radijalnih ili radijalno-aksijalnih opterećenja. Za isključivo aksijalna opterećenja koriste se kolutni ležaji, koji se

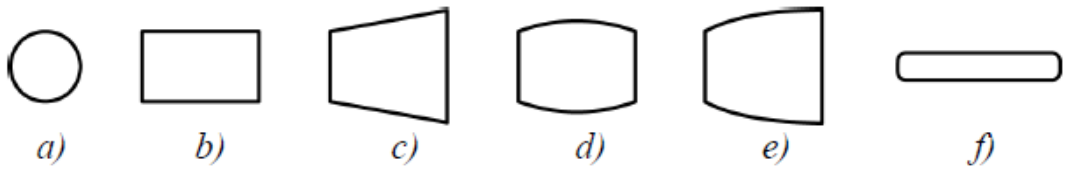
sastoje od dva koluta i kotrljajnih elemenata (Slika 2.98, poz. 1, 2 i 4). Osnovni geometrijski parametri ležaja uključuju prečnik provrta (d), prečnik ležaja (D), širinu ležaja (B) i visinu aksijalnog ležaja (H).



Slika 2.98. Kotrljajući kolutni ležaj: 1. spoljašnji kolut, 2. kotrljano tijelo –kuglica, 3. rukavac, 4. unutrašnji kolut

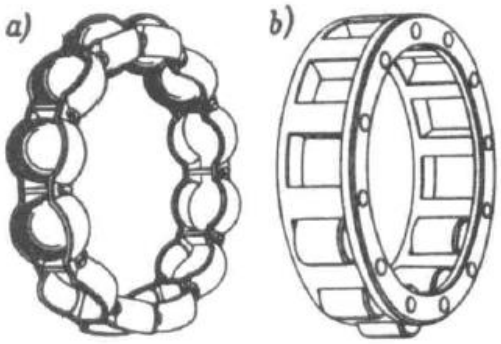
Kotrljajući ležajevi imaju značajne prednosti u odnosu na klizne ležajeve. Trenje kotrljanja je približno 50% manje od trenja klizanja, što ih čini efikasnijim. Osim toga, rade s manjim zazorom, što je posebno važno u aplikacijama gdje je preciznost ključna. Njihove dimenzije su relativno male, a potrebna količina maziva je minimalna, što smanjuje potrebu za čestim održavanjem. Dodatna prednost je njihova standardizacija, koja omogućava široku primjenu i jednostavnu izmjenljivost. Međutim, kotrljajući ležajevi imaju i određene nedostatke. Osjetljivi su na udarna opterećenja, pri radu su bučniji u poređenju s kliznim ležajevima i imaju relativno visoku cijenu u poređenju s kliznim varijantama.

Kotrljajući elementi (Slika 2.99) mogu biti: kuglice (a), valjčići (b), konusni valjčići (c), burići ili bačve (d), konusni burići (e) i iglice (f). Zavisno od oblika kotrljajnih tijela i od oblika prstenova i kolutova postoje različite standardni tipovi ležaja koji mogu da nose različita opterećenja i da se koriste u različitim uslovima rada.



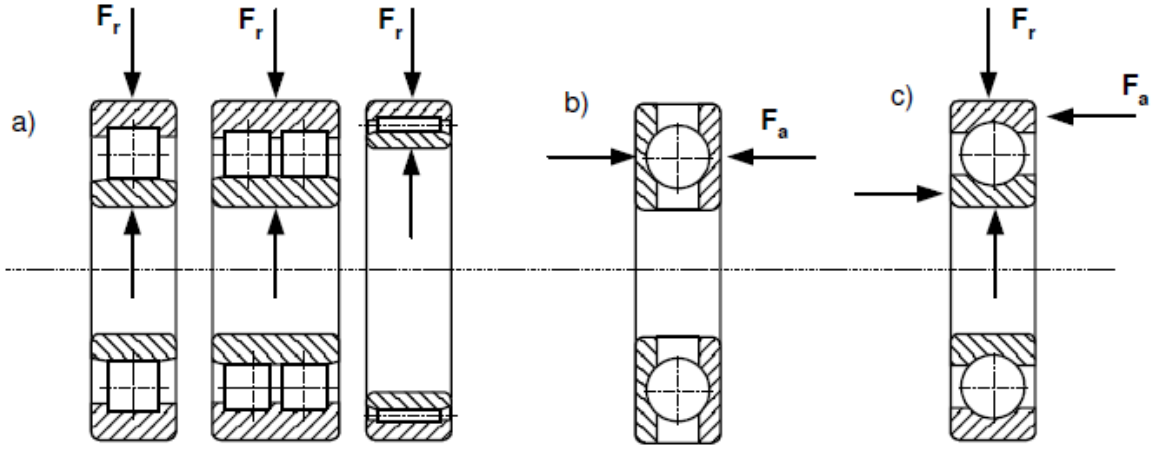
Slika 2.99. Oblici kotrljajućih elemenata

Uz kotrljajuća tijela u ležaju se nalazi i kavez koji drži kotrljajuća tijela na međusobno konstantnoj udaljenosti te sprečava međusoban dodir tijela (Slika 2.100).



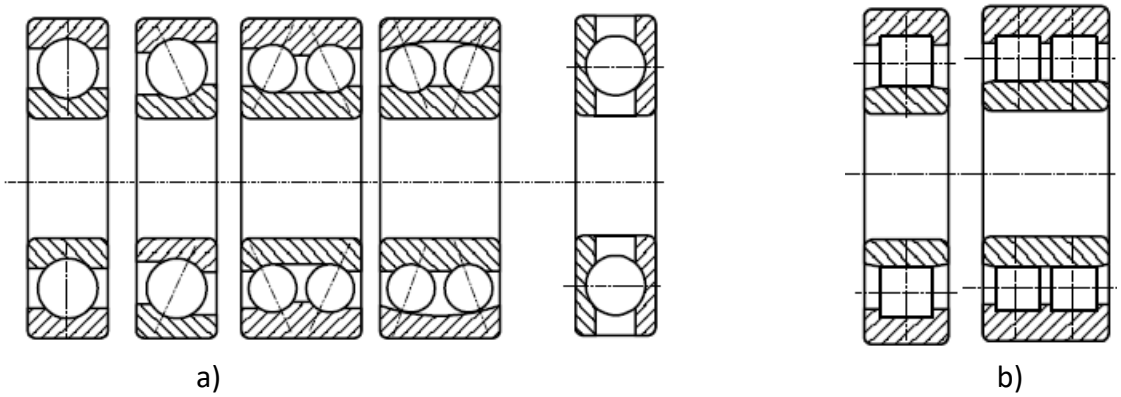
Slika 2.100. Kavez kugličnih i valjkastih ležaja (Decker, 1980)

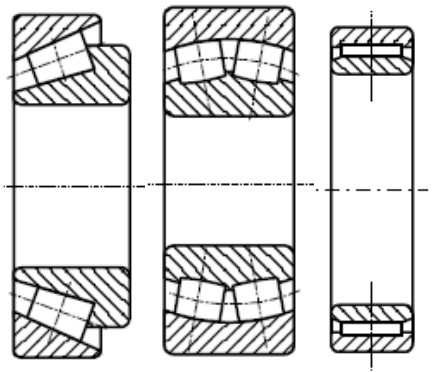
S obzirom na sile koje ležaji preuzimaju na sebe, postoje, (Slika 2.101): radijalni (a), aksijalni (b), utorni kuglični radijalni (preuzimaju i radijalne i aksijalne sile) (c).



Slika 2.101. Radijalni (a), aksijalni (b) i radijalno-aksijalni (c) kuglični leežaji

Valjkasti ležaji se izvode isključivo za preuzimanje radijalnih opterećenja (Slika 2.102a). Stožasti (konični) ležaj dizajniran je za preuzimanje velikih radijalnih i jednosmjernih aksijalnih sila. Bačvasti ležaj, zahvaljujući svojoj samopodesivosti, omogućava kompenzaciju manjih ugaonih odstupanja, čime se osigurava stabilnost sistema. Igličasti ležaji, zbog svojih malih dimenzija, mogu podnijeti značajne radijalne sile, ali nisu prilagođeni za preuzimanje aksijalnih opterećenja.



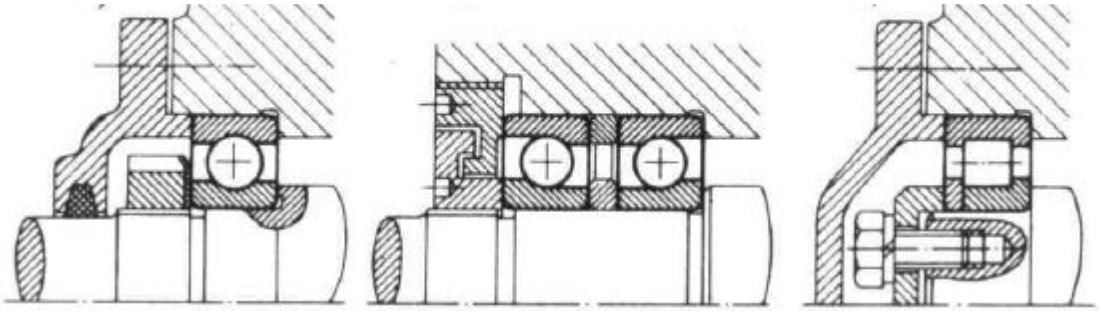


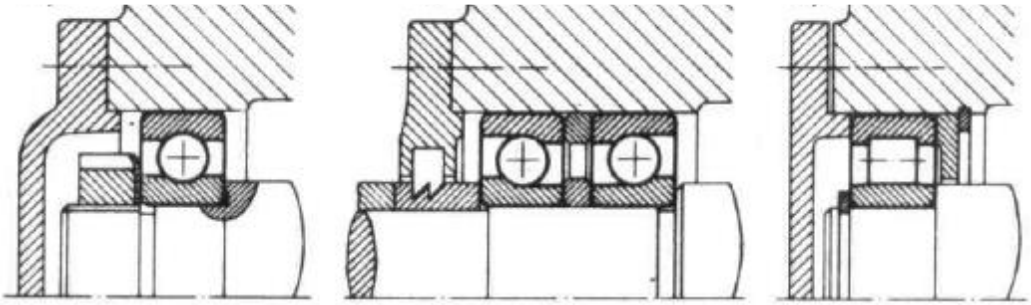
Slika 2.102. Izvedbe kotrljajnih tijela



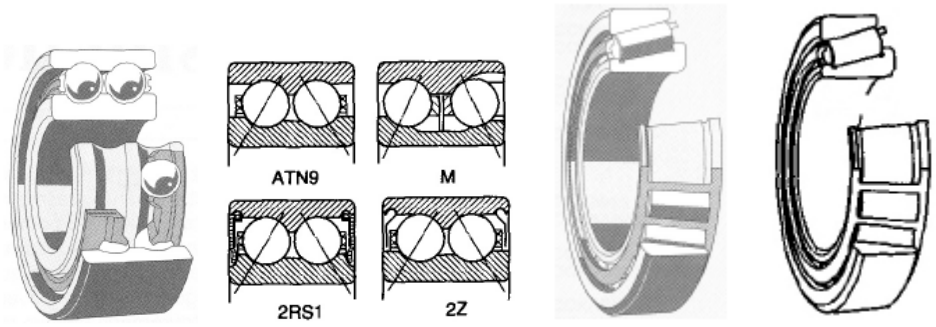
Slika 2.103. Osnovni tipovi ležajeva: a) kuglični, b) valjkasti, c) konusni, d) bačvasti, e) igličasti

Ugradnja ležaja zavisi od tipa ležaja, opterećenja te oblika vratila i kućišta. Zbog učvršćenja vratila u uzdužnom smjeru, jedan ležaj se uvijek izvodi kao čvrsti ležaj (prenosi aksijalne I radijalne sile (Slika 2.104). Zbog omogućavanja aksijalnih dilatacija vratila uslijed temperaturnih promjena, drugi ležaj se obavezno izvodi kao slobodni ležaj (omogućava aksijalne pomake (Slika 2.105).


Slika 2.104. Primjeri oblikovanja čvrstih ležaja (Decker, 1980)

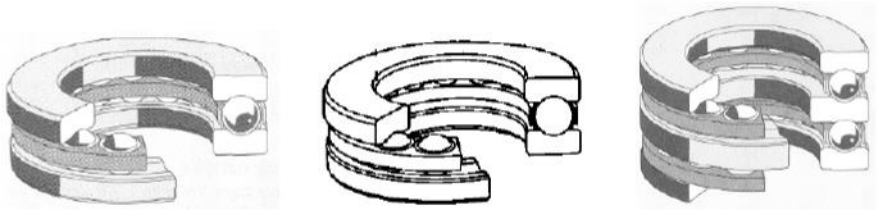

Slika 2.105. Primjeri oblikovanja slobodnih ležaja (Decker, 1980)

Tip ležaja označava se oznakama poput: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, N, NA, NU, NJ, NUP, NN, NNU, QJ i U. Pored ovih osnovnih standardnih tipova, proizvode se i specijalni tipovi ležaja. Na primjer, ležaj tipa 0 je prstenasti kuglični dvoredni ležaj s kosim dodirom (Slika 2.106). Ovi kuglični ležaji imaju kotrljajne staze na unutrašnjem i spoljašnjem prstenu koje su pomjerene u odnosu jedna na drugu duž aksijalne ose ležaja. Karakterišu ih sposobnost preuzimanja velikih radijalnih i aksijalnih opterećenja, prilagođenost srednjim i velikim brzinama, te činjenica da nisu rastavljivi.



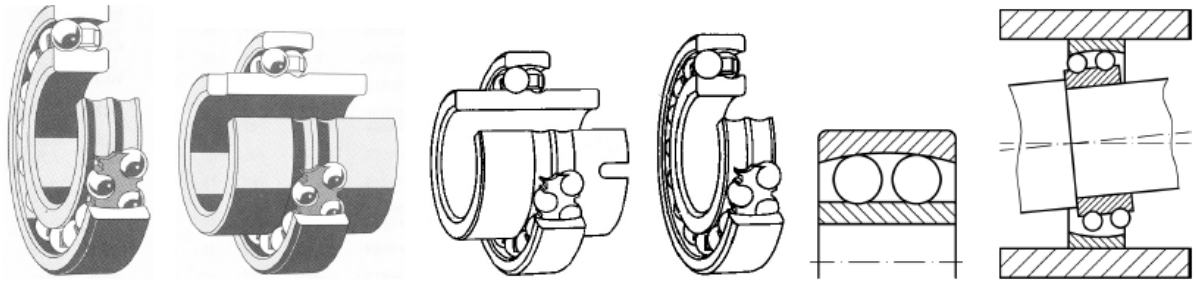
a) b)

Slika 2.106. Dvoredni kuglični ležaj sa kosim dodirom tipa 0 (a), konusni prstenasti valjkasti ležaj tipa 3 (b)



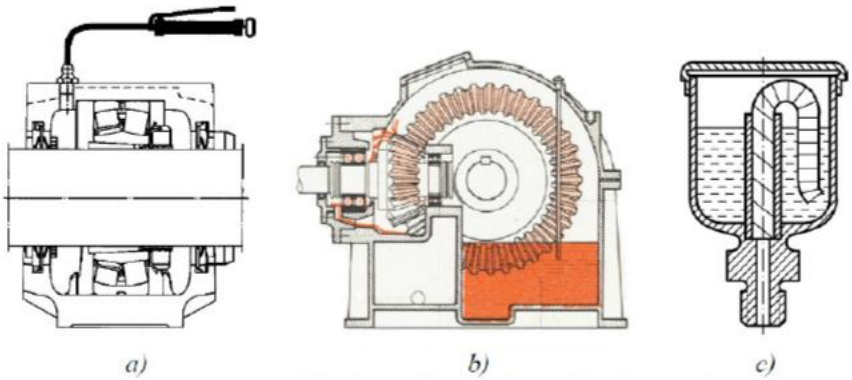
Slika 2.107. Kolutni aksijalni kuglični ležaj tipa 5

Ležaji tipa 1 su samopodesivi prstenasti kuglični dvoredni ležaji (Slika 2.108). Ovi ležaji imaju sposobnost prilagođavanja ugaonim odstupanjima vratila u odnosu na ležaj i kućište, s maksimalnim uglom zakretanja do 4°. Namijenjeni su za preuzimanje velikih radijalnih i manjih aksijalnih opterećenja. Njihova primjena je posebno pogodna za dugačka vratila koja osciluju, kao i za sva vratila koja tokom rada trpe radijalna zakretanja.

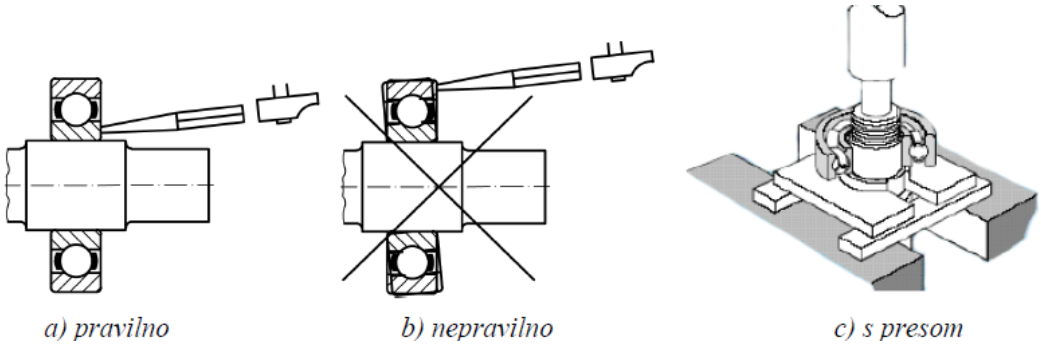


Slika 2.108. Samopodesivi kuglični dvoredni ležaji tipa 1 (Gligorić, 2020)

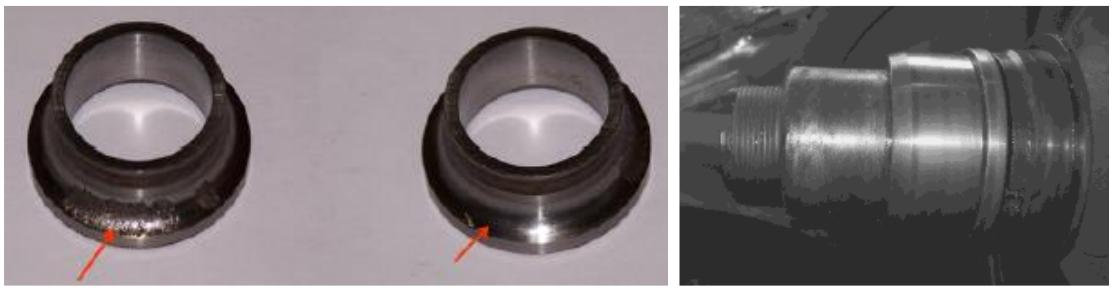
Pravilno korišćenje ležaja se sastoji u tome da se: ne preopterećuju, redovno podmazuju, kontrolišu i prati njihova ispravnost i na vrijeme zamjene sa novim, adekvatne oznake.



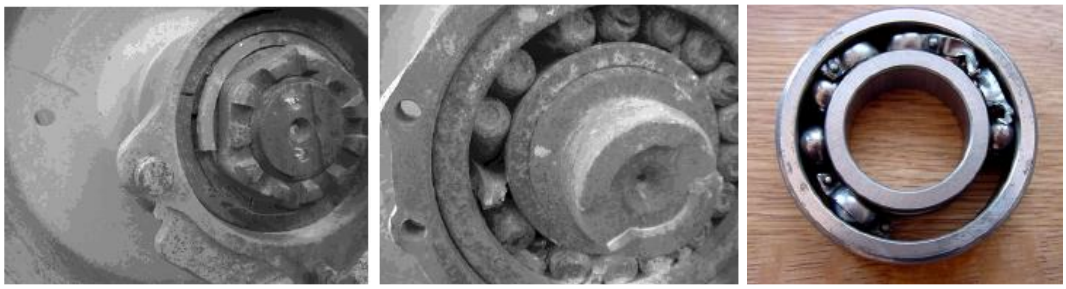
Slika 2.109. Podmazivanje kotrljajućih ležajeva: mazalicom a), stalno podmazivanje zapljuskivanjem pomoću zupčanika b), ili stalno podmazivanje sa fitiljem koji je u posudi sa mazivom c)



Slika 2.110. Demontaža ležaja sa rukavca



a) b)



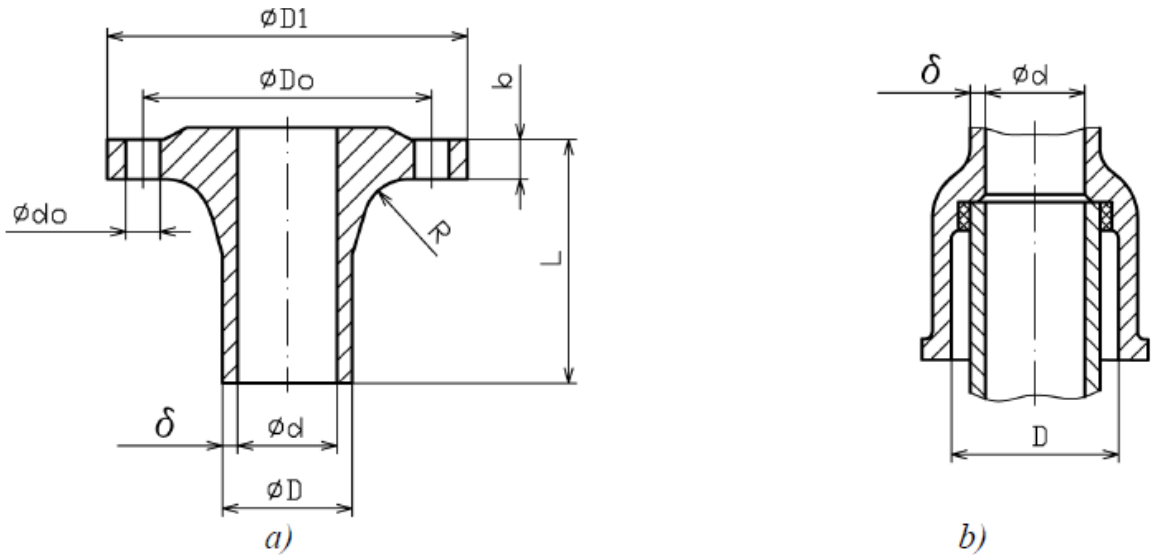
c) d) e)

Slika 2.111. Oštećenja ležaja: mikropukotine a), oštećenje korozijom b), posljedica nezaptivenog kućišta c), oštećenje kaveza d), drobljenje i topljenje kotrljajnih elemenata e) (Gligorić, 2020)

2.5. Mašinski elementi za provođenje fluida

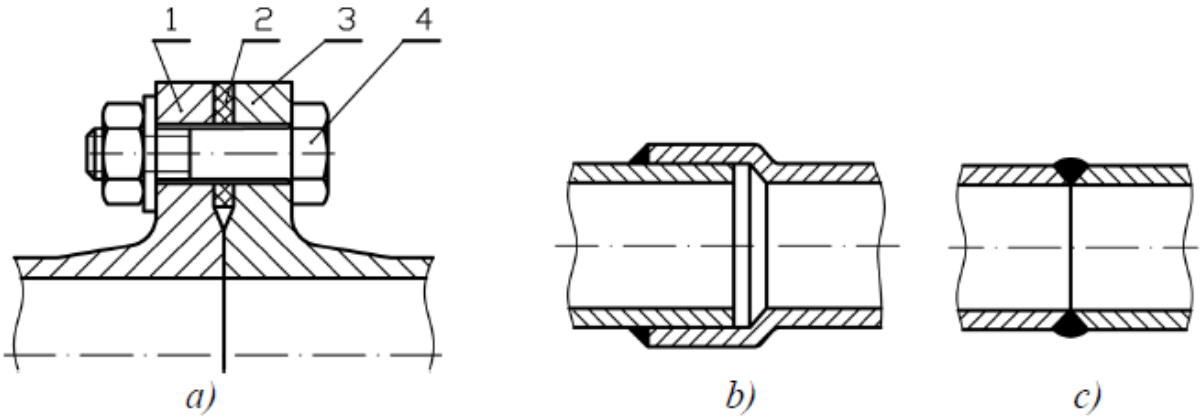
Mašinski elementi za provođenje fluida koriste se za transport vode, nafte, benzina, ulja, gasa i drugih tečnih i gasovitih jedinjenja. Ova grupa obuhvata cijevi za transport, posude za skladištenje, cjevne zatvarače i sigurnosne uređaje. Materijal cijevi zavisi od mjesta i uslova primjene, pa se izrađuju od sivog liva, čeličnog liva, bakra, olova, plastičnih masa, gume i keramike. Cijevi od sivog liva pogodne su za vodovod i kanalizaciju u podzemnim instalacijama, ali su teške, nepogodne za visoke pritiske i niske temperature. Bakrene cijevi se koriste u prehrambenoj industriji zbog otpornosti na koroziju i savitljivosti, ali im je cijena visoka. Olovne cijevi otporne su na kiseline, zbog čega se primjenjuju u hemijskoj industriji. Cijevi od plastičnih masa sve više dolaze u upotrebu jer su lagane, otporne na koroziju i ekonomičnije od drugih materijala. Konstruktivni oblici i dimenzije cijevi određeni su standardima i proizvode se serijski.

Standardni oblik cijev sa prirubnicom (Slika 2.112a) različitih vrijednosti unutrašnjeg prečnika d, debljine δ, prečnika prirubnice *Do* i dužine *L*. Drugi oblik cijevi je sa jednim proširenim krajem (Slika 2.112b). koje se jednostavno spajaju sa drugom cijevi, a zaptivanje je pomoću zaptivnog prstena između njih (Gligorić, 2020).



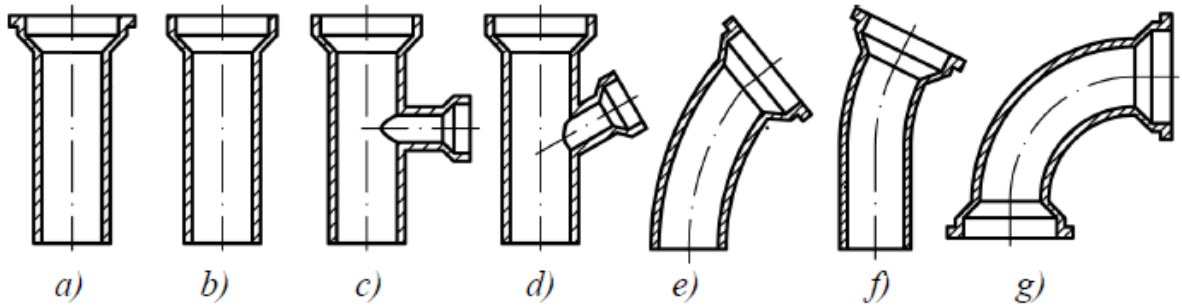
Slika 2.112. Standardni oblici cijevi: a) sa prirubnicom, b) sa zaptivnim prstenom (Gligorić, 2020; Miltenović i Ognjanović, 1995)

Spajanje cijevi se izvodi na različite načine, što zavisi od oblika cijevi (Slika 2.113).



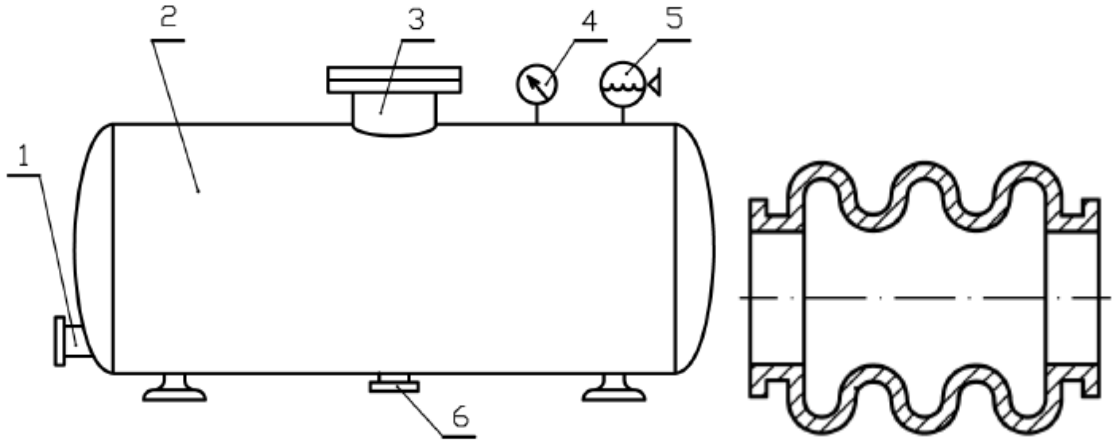
Slika 2.113. Spajanje cijevi: a) pomoću vijaka, b) i c) zavarivanjem (Gligorić, 2020)

Za nastavljanje i spajanje cijevi koriste se različiti cjevni priključci Slika 2.114.



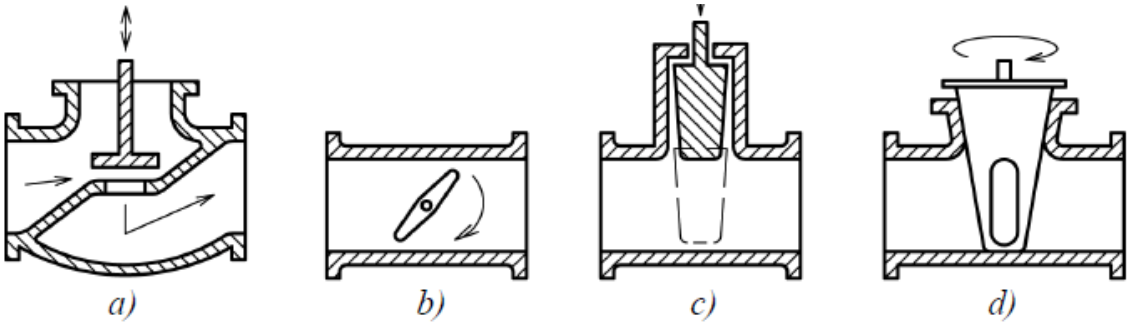
Slika 2.114. Cjevni priključci: a) pravougli sa prirubnicom, b) pravougli sa proširenim krajem, c) pravougla račva, d) kosougla račva, e) lučni, f) polulučni, g) koljenasti

Pri promjeni temperature dolazi do širenja i skupljanja cijevi i da bi se omogućila dilatacija cijevi koriste se kompenzacione cijevi različitih oblika (Slika 2.115). Njihov oblik dozvoljava širenje cijevi radijalno, a ne uzdužno, što štiti od pucanja i lomova cijevi.

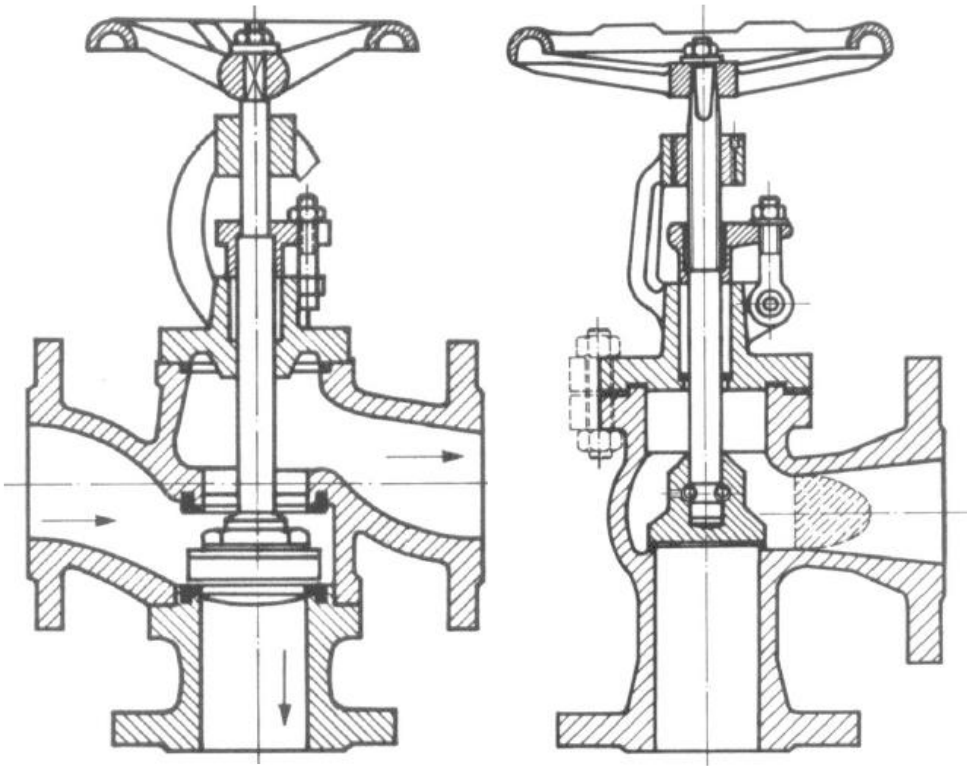


Slika 2.115. Rezervoar za odlaganje fluida (lijevo): 1-otvor za istakanje, 2-rezervoar, 3-otvor za punjenje, 4-manometar, 5-pokazivač nivoa, 6-otvor za pranje; kompenzaciona cijev (desno)

Ventili se najčešće pomjeraju upravno na sjedište otvora u cijevi, bilo da se pomjeraju ručno ili automatski. Pomjeranjem ventila (Slika 2.116) zatvara se ili otvara protok fluida kroz cijevi. Sigurnosni ventili se automatski otvaraju pri povećanom pritisku fluida, a pri prestanku povećanog pritiska se zatvaraju.



Slika 2.116. Elementi za regulisanje protoka fluida: a) ventil, b) priklopac, c) zasun, d) slavina (Gligorić, 2020)


Slika 2.117. Ventil za promjenu smjera lijevo, i ugaoni ventil desno, (Decker, 1980)

Literatura:

Decker, K.-H. (1980). Elementi strojeva. Zagreb: Tehnička knjiga. 530 str

Dedić, A. (2008). Osnovi mašinstva, dio II. Beograd: Šumarski fakultet.

Domazet, Ž., Krstulović-Opara, L. (2006). Osnove strojarstava. Split: Kemijsko-tehnološki fakultet, Sveučilište u Splitu.

Ercegović, Đ. (1994). Mašinski elementi. Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Beogradu, Nauka, Beograd.

Globočki-Lakić, G. (2023). Mehanizacija u šumarstvu: Separati predavanja i vježbi u elektronskoj formi. Banja Luka: Šumarski fakultet.

Gligorić, R. (2020). Mašinski elementi. Novi Sad: Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.

Hrgešić, V., & Baldani, J. (1990). Mehaničke konstrukcije. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet.

Miltenović, V., & Ognjanović, M. (1995). Mašinski elementi I, II i III. Beograd: Mašinski fakultet, Niš.

Mumibović, A., & Mesić, E. (2016). Oblikovanje i proračun zavarenih konstrukcija. Sarajevo.

Ognjanović, M., Plavšić, N., & Janković, M. (1991). Teorija mašinskih elemenata. Beograd: Mašinski fakultet.

3. MOTORI SA UNUTRAŠNJIM SAGORIJEVANJEM – SUS MOTORI

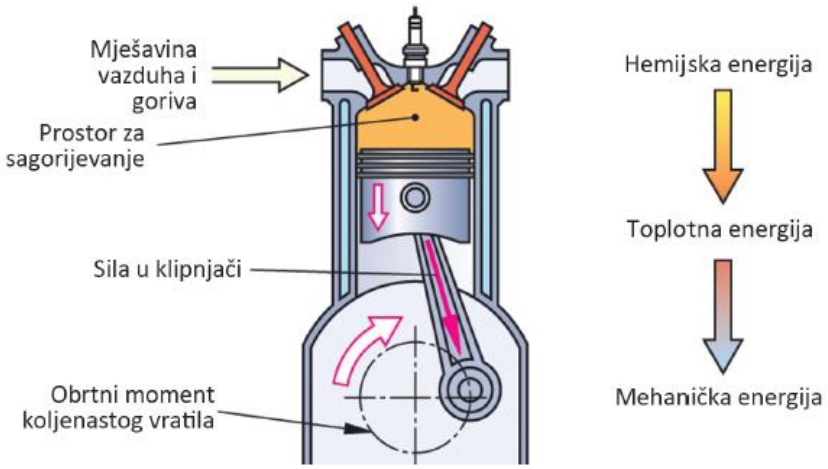
Motor je mašina koja neki određeni vid energije pretvara u mehanički rad. Toplotni motori su mašine koje toplotnu energiju, razvijenu sagorijevanjem goriva, koriste za realizaciju mehaničkog rada. Kada se govori o motorima automobila, traktora i drugih radnih mašina prvenstveno se misli na motore s unutrašnjim sagorijevanjem. Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem (motori SUS) su motori kod kojih se u jedinstvenom prostoru obavlja i sagorijevanje (oslobađa toplotna energija) i ostvaruje mehanički rad direktnim dejstvom produkata sagorijevanja. Motori SUS spadaju u grupu toplotnih motora.

3.1. Podjela i princip rada

Klipni motori sa unutrašnim sagorijevanjem se uglavnom primjenjuju za pogon motornih vozila. Toplotna energija koja nastaje u procesu sagorijevanja može se indirektnim putem pretvoriti u mehanički rad – to su motori sa spoljašnjim sagorijevanjem ili direktnim putem – to su motori sa unutrašnjim sagorijevanjem – SUS motori, gdje produkti sagorijevanja direktno ostvaruju mehanički rad.
Dakle, osnovna podela je na:

1. Motore sa spoljnim sagorevanjem (SSS) i
2. Motore sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS):
    - Strujni motori (gasne turbine i mlazni motori) - mahanički rad se ostvaruje korištenjem kinetičke energije produkata sagorijevanja
    - Motori promjenljive zapremine radnog prostora (rotacioni i klipni motori)- mehanički rad se ostvaruje korištenjem potencijalne energije.

U nastavku fokus je na SUS motorima promjenljive zapremine radnog prostora (Slika 3.1) (Milašinović i Knežević, 2010).



Slika 3.1. Transformacija energije u klipnom SUS motoru (Milašinović i Knežević, 2010)

Za ove motore je karakteristično da rade s dosta visokom temperaturom ciklusa (oko 2500 K) pa je moguće ostvariti dobru ekonomičnost. Motori promjenljive zapremine na različite

načine mogu ostvariti promjenljivost (npr. obrtnim klipom - Vankel motor) ili klipom koji vrši naizmjenično oscilatorno kretanje uz pomoć klipnog mehanizma - klipni motor sa unutrašnjim sagorijevanjem (slika 3.1.).
Klipni motori SUS rade na principu ekspanzije gasa u promjenljivoj zapremini radnog prostora. Mehanički rad je jednak:

$$\Delta W = p \cdot \Delta V$$

gdje je: *ΔW* je ostvareni rad, *p* je pritisak i *ΔV* je promjena zapremine.

U radnom prostoru se obavlja: izmjena radne materije, sagorijevanje i ekspanzija.

Dvije su osnovne grupe klipnih SUS motora:

- OTO motori
- Dizel motori.

Osnovne karakteristike OTO motora:

- Homogena dobro izmješana smješa,
- Spoljnje obrazovanje smješe,
- Paljenje smješe varnicom,
- Sagorijevanje je regulisanom brzinom prostiranja plamena kroz komoru motora.

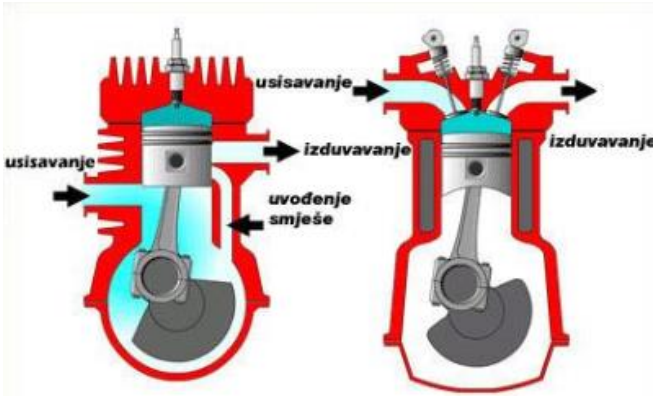
Dobre osobine su im visoka snaga po 1 cm^3, dobro prihvatanje promjenljivih režima rada i laka konstrukcija, a glavni nedostatak je mali stepen iskorišćenja.

Osnovne karakteristike dizel motora:

- Heterogena smješa dobijena ubrizgavanjem goriva u sabijeni vazduh (gorivo, smješa, čist vazduh),
- Paljenje smješe samozapaljenjem,
- Unutrašnje obrazovanje gorive smješe i kontrolisano sagorijevanje sa malim porastom pritiska.

Dobra osobina im je visok stepen iskorišćenja, a nedostaci su mala snaga po 1 cm^3 usljed viška vazduha i masivna konstrukcija.

Prema načinu izmjene radne materije - broju taktova, dijele se na: četvorotaktne i dvotaktne motore (Slika 3.2). Kod četverotaktnih motora radni ciklus odvija se u četiri takta tj. za dva okretaja koljenastog vratila, dok se kod dvotaktnih motora odvija u dva takta, tj. za jedan okretaj koljenastog vratila.



Slika 3.2. Dvotaktni i četverotaktni motor

Dvotaktni OTO motori su sve rjeđe u upotrebi, uglavnom zbog ekoloških i ekonomskih razloga. Glavni problem ovih motora leži u tome što dio radnog medija (gorive smjese) izlazi iz cilindra neizgoren, što povećava potrošnju goriva i emisiju štetnih gasova. Zbog toga su mali dvotaktni OTO motori u velikoj mjeri zamijenjeni četverotaktnim motorima, čak i u aplikacijama gdje su ranije bili dominantni, poput vanbrodskih motora, motora za motocikle i poljoprivredne mašine.

S druge strane, dvotaktni Diesel motori i dalje dominiraju u brodskom pogonu. Većina brodova pokreće se dvotaktnim sporohodnim Diesel motorima, koji su najveći motori s unutrašnjim sagorijevanjem. Oni dostižu ukupni stepen djelovanja od oko 53%, čime se svrstavaju među najefikasnije motore, odnosno najekonomičnije toplotne mašine. Ova karakteristika čini velike dvotaktne Diesel motore ključnim za brodski transport.

Prema broju cilindara se dele na: jednocilindrične i višecilindrične.

Prema položaju cilindara se dele na: vertikalne, horizontalne i pod uglom.

Prema rasporedu cilindara (Slika 3.3.) mogu biti: linijski (dvoklipni linijski motor-a), “V” motor (b), bokser (c), zvjezdasti (d), “X” motor (e), Δ motor (f) i sl.

Podjela prema brzohodnosti je na:

- Sporohodne (n < 250 o/min),
- Srednje brzohodne (n = 250 – 1000 o/min),
- Brzohodne motore (n = 1000 - 3000 o/min),
- Super brzohodne motore (n > 3000 o/min).

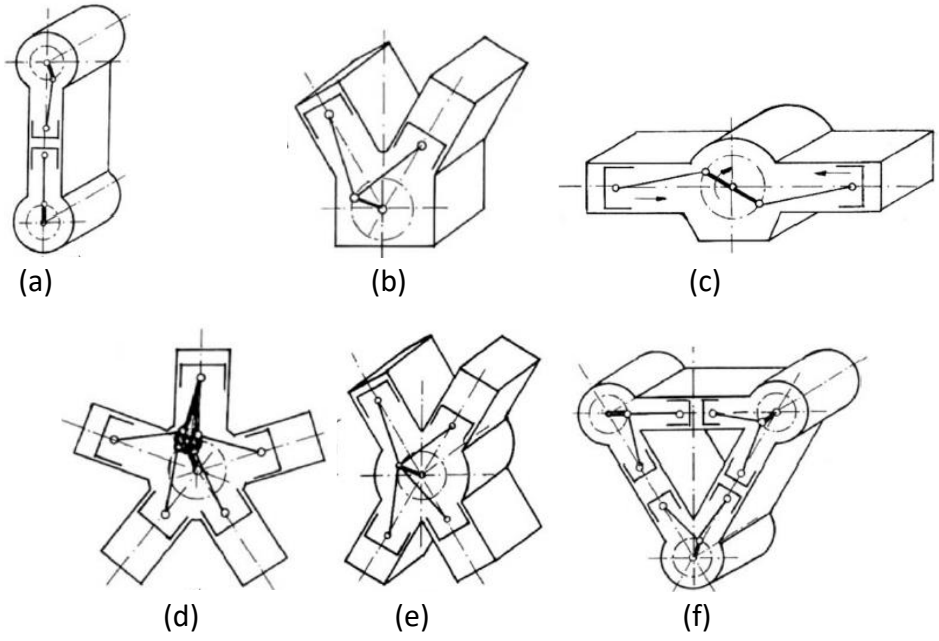
Prema vrsti hlađenja mogu biti:

- Motori sa vazdušnim hlađenjem,
- Motori hlađeni tečnošću za hlađenje.

Podjela prema namjeni: stacionarni, vozilski, brodski, avionski.

Prema načinu dejstva mogu biti :

- Jednostrukog i
- Dvostrukog dejstva.





Redni motor V motor Nasuprotni - Bokser motor

Slika 3.3. Konstrukcione izvedbe motora prema međusobnom položaju cilindara (Filipović, 2006)

Brojne su prednosti klipnih motora, od čega se posebno izdvaja ekonomičnost i dobra specifična snaga, dok su osnovni nedostaci veliki broj dijelova i njihova komplikovana izrada, relativno visoka zavisnost od kvaliteta goriva, a prisutna je buka i toksična emisija. U šumarstvu se danas prvenstveno koriste klipni motori SUS za pogon traktora, motornih testera, i mnogih ostalih mašina u šumarstvu.

Mrtve tačke klipnog mehanizma su položaji klipnog mehanizma kada se osa klipnjače nalazi u ravni koljena, tj. položaj kada je brzina klipa jednaka nula.

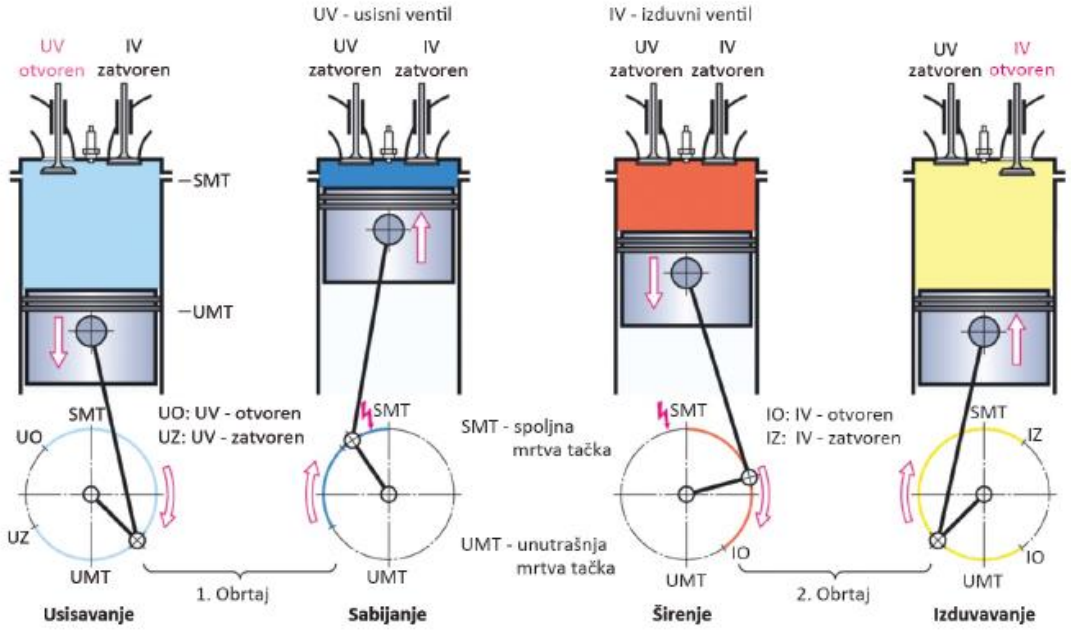
Spoljašnja mrtva tačka (SMT) je položaj klipa u cilindru pri kojem je klip maksimalno udaljen od ose koljena koljenastog vratila.

Unutrašnja mrtva tačka (UMT) je položaj klipa u cilindru pri kojem je klip minimalno udaljen od ose koljena koljenastog vratila (Torović i Antonić, 1997)

Hod klipa je rastojanje između krajnjih položaja klipa, (tj. između mrtvih tačaka klipnog mehanizma) mjereno po osi cilindra. Pri svakom hodu, koljeno koljenastog vratila se obrne za 180˚.

Princip rada četverotaktnog klipnog motora SUS prikazan je na Slici 3.4. U radnom prostoru, koji je u obliku cilindra, klip se kreće prinudno oscilirajući pod dejstvom tzv. klipnog mehanizma i na taj način ostvaruje radni process koji se sastoji od četiri faze.

Sa početkom od spoljašnje mrtve tačke (SMT), prva faza je usisavanje radne materije kada se u radni prostor uvodi novo punjenje. Druga faza je sabijanje punjenja od unutrašnje (UMT) do spoljašnje mrtve tačke (SMT). Ova faza je potrebna zbog postizanja višeg energetskog potencijala pogodnog za efikasno sagorijevanje. Treća faza je ekspanzija, odnosno širenje koje se odvija od SMT do UMT. Četvrta faza je izduvavanje, odnosno izbacivanje produkata sagorijevanja. Nakon toga se proces ponavlja.



Slika 3.4. Princip rada četverotaktnog motora (Milašinović i Knežević, 2010)

Motor sa unutrašnjim sagorijevanjem je pogonski agregat koji se sastoji od: elemenata, spojeva, mehanizama i sistema (Veinović, 1980).

Element je dio SUS motora koji je izrađen od jednorodnog materijala gdje nisu primjenjene operacije spajanja.

Spoj je veza dva ili više elemenata koji su povezani elementima za vezu i čine jednu cjelinu.

Mehanizam je skup više elemenata i spojeva u kojem kretanje jednog elementa potpuno definiše kretanje ostalih elemenata.

Sistem je skup više elemenata i mehanizama koji su povezani sa ciljem izvođenja zajedničke funkcije.

Agregat je spoj više sistema i mehanizama u jednu cjelinu.

Osnovni mehanizmi SUS motora su:

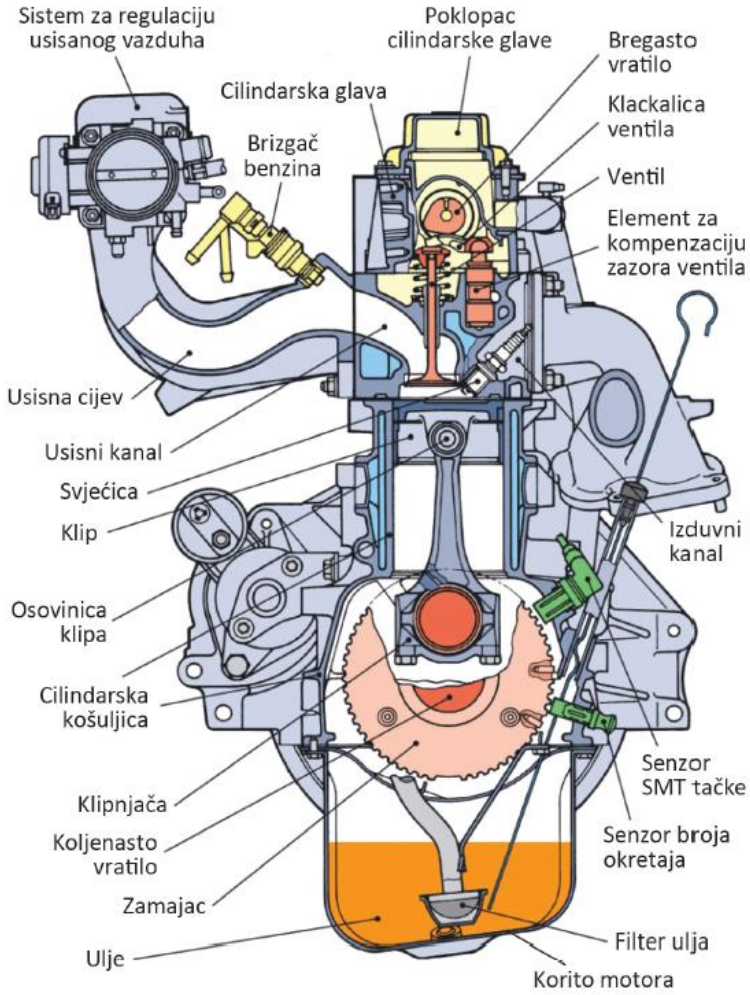
1. Klipni mehanizam
2. Mehanizam za izmjenu radne materije.

Klipni mehanizam prima sile gasova i pretvara pravolinijsko oscilatorno kretanje klipa u obrtno kretanje koljenastog vratila. Čine ga dvije grupe: pokretna i nepokretna grupa elemenata.

Na Slici 3.5. prikazani su dijelovi četverotaktnog benzinskog SUS motora (Milašinović i Knežević, 2010)

Pokretni elementi su: klip sa osovinicom i klipnim prstenovima, klipnjača, koljenasto vratilo (radilica), zamajac i njima pripadajući elementi za vezu.

Nepokretni elementi su: blok cilindra, cilindarska glava, korito motora (karter) i njima pripadajući elementi za vezu. Skup nepokretnih elemenata se često naziva tijelom motora.



Slika 3.5. Dijelovi benzinskog četverotaktnog SUS motora (Milašinović i Knežević, 2010)

Mehanizam za izmjenu radne materije – čini ga skup elemenata koji su zaduženi za unošenje u cilindar svježe smješe (karburatorski i gasni motori) ili vazduha (dizel motori), kao i odstranjivanje iz cilindra nastalih produkata sagorijevanja.

Osnovni sistemi motora SUS su:

- ***Sistem za hlađenje*** - zadatak mu je da obezbijedi normalnu temperaturu u svim eksploatacijskim režimima rada motora. Čine ga različiti elementi i mehanizmi u zavisnosti od načina hlađenja.
- ***Sistem za podmazivanje*** - zadatak mu je da obezbijedi dovođenje sredstva za podmazivanje na dodirne površine između pokretnih dijelova motora s ciljem smanjenje trenja i habanja.
- ***Sistem za napajanje motora gorivom*** - zadatak mu je da omogući pripremanje svježe smješe goriva I vazduha I njeno dovođenje u cilindar kod karburatorskih I gasnih motora I odvojeno dovođenje goriva I vazduha u cilindre dizel motora (Torović i Antonić, 1997; Pešić et al., 2008)
- ***Sistem za paljenje*** **-** zadatak mu je da obezbijedi paljenje radne smješe kod karburatorskih i gasnih motora. Dizel motori nemaju sistem paljenja jer se kod njih gorivo pali usljed njegovog dodira sa vrelim sabijenim vazduhom.
- ***Sistem za startovanje*** **-** predstavlja skup specijalnih mehanizama koji izvode brzo i poudano startovanje motora.

Motori SUS mogu imati još i dopunske sisteme: sistem za regulisanje i automatizaciju, sistem za neutralizaciju produkata sagorijevanja i sistem tehničke dijagnostike (Torović i Antonić, 1997).

3.2. Pokretni i nepokretni dijelovi motora SUS

Osnovni dijelovi motora se dijele na pokretne i nepokretne. Kod dvotaktnog motora pokretni dijelovi su: klip, klipnjača i radilica sa zamajcem. Ostali dijelovi su nepokretni.

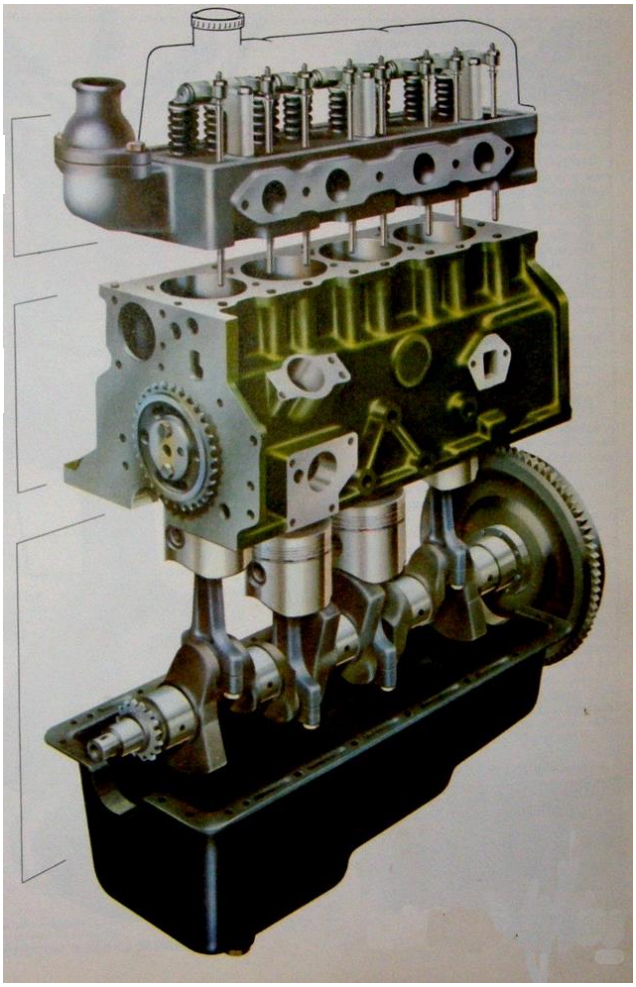
Glavni nepokretni dijelovi su:

- Poklopac cilindarske glave,
- Cilindarska glava sa vijcima za prčvršćivanje na blok motora,
- Blok motora,
- Zaptivka bloka motora,
- Karter (korito motora).

Glava cilindra

Blok cilindra

Kućište koljenastog vratila



Slika 3.6. Glavni nepokretni dijelovi motora SUS: glava motora, blok motora i kućište koljenastog vratila.

Glavni pokretni dijelovi četverotaktnog motora SUS su:

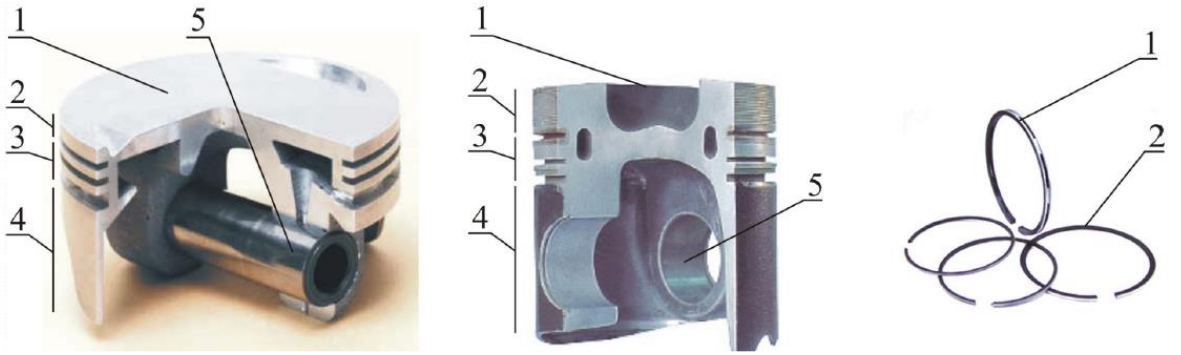
- Klipna grupa (klip, klipni prstenovi, osovinica i osigurači),
- Klipnjača sa kliznim ležajevima u maloj i velikoj pesnici klipnjače,
- Koljenasto vratilo sa zamajcem sa zupčastim vijencem i zupčanikom za pogon razvodnog mehanizma.



Slika 3.7. Glavni pokretni dijelovi motora SUS

Glavni zadatak klipne grupe je:

- Prijem sile pritiska gasova i prenos sile na klipnjaču,
- Zaptivanje radnog prostpora motora,
- Obezbjeđivanje dobrog podmazivanja kliznih površina sopstvenog sklopa i cilindra,
- Odvođenje toplote sa čela klipa na košuljicu,
- Primanje normalne sile klipnog mehanizma i njeno prenošenje na cilindarsku košuljicu,
- Učešće u formiranju komore sagorijevanja oblikom svog čela,
- Kod dvotaktnih motora klip učestvuje u razvodu radne materije.



a) b)

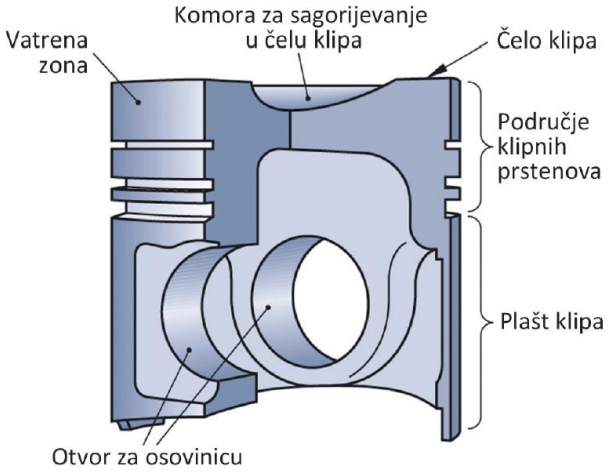
Slika 3.8. Klipna grupa – konstrukcija: a) 1 - čelo klipa, 2 - vatrena zona, 3 - zona klipnih prstenova, 4 - plašt klipa, 5 - osovinica; b) 1 - uljni klipni prsten, 2 - kompresioni klipni prsten

Osnovne karakteristike klipa uključuju nekoliko ključnih zahtjeva koji osiguravaju njegovu efikasnost i dugovječnost. Masa klipa treba biti što manja kako bi se smanjila sila inercije pri velikim brzinama kretanja. Čelo (dno) klipa mora imati veliku krutost, dok krutost u području ležaja osovinice treba biti manja, a plašt klipa elastičan. Klipni utori moraju imati dovoljnu čvrstoću kako bi se spriječilo oštećenje od strane karika.

Čvrstoća klipa mora biti zadržana i na povišenim temperaturama, naročito u području čela klipa. Materijal klipa treba imati dobru toplotnu provodljivost kako bi se minimizirale temperaturne razlike na klipu i omogućilo efikasno odvođenje toplote prema cilindru.

Konstrukcija klipa treba da osigura minimalno rastezanje pri povećanju temperature, čime se postiže manji zazor između klipa i cilindra u hladnom stanju, što doprinosi boljem zaptivanju.

Zadaci klipa su: da prenosi sile gasova na koljenasto vratilo, da učestvuje u kružnom procesu motora, da pomaže pri zaptivanju kompresionog prostora, da prihvata velike promjene pritisaka i temperature istovremeno, da prima inercione sile od kompresionih prstenova, da vrši odvođenje određene količine toplote i da se pomoću njega utiče na smanjenje specifične potrošnje goriva kao i smanjenje emisije štetnih komponenti u produktima sagorijevanja. Igled klipa je prikazan na Slici 3.9, a oblici glave klipa na Slici 3.10.



Slika 3.9. Osnovni dijelovi klipa (Milašinović i Knežević, 2010)



a) b) c)

Slika 3.10. Oblici glave klipa: a) ispupčen, b) udubljen, c) ravan

Kao materijali za izradu klipova najviše se koriste materijali na bazi gvožđa (specijalno legirani sivi liv, nodularin liv i aluminijumske legure jer imaju malu specifičnu masu (3 puta manju od gvožđa) i bolji koeficijent toplotne provodljivosti (3 puta veći od gvožđa), imaju 1,5-2 puta veći koeficijent toplotne dilatacije u odnosu na gvožđe koji se rješava tzv. autotermičkom konstrukcijom klipa.

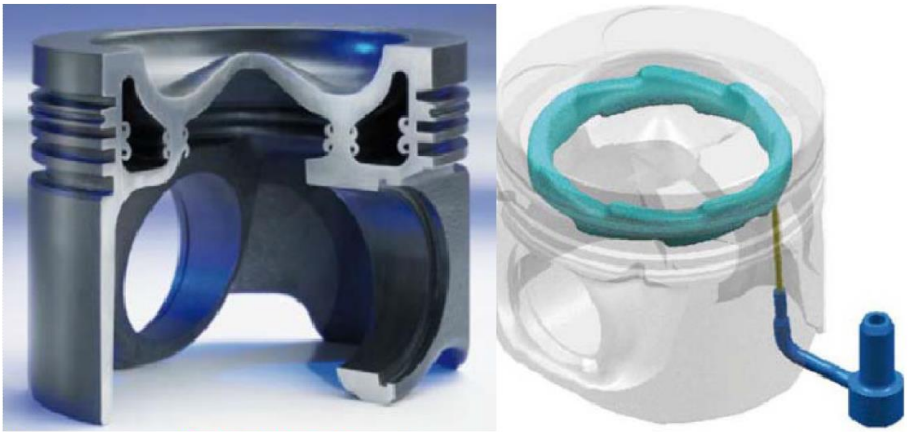
Nagli razvoj dizel motora je rezultovao motorima izuzetno velike specifične snage. Npr. najveći pritisci u cilindru dizel motora za putnička vozila prešli su granicu od 2000 bara. U poređenju sa cilindrom i glavom motora, klip je slabo hlađen, a njegovo čelo je izloženo visokim pritiscima. Zato su proizvođači klipova za motore teretnih vozila, a kasnije i putničkih vozila

počeli primjenjivati čelik za izradu klipova koji ima znatno veću čvrstoću kod povišenih temperatura od aluminijumskih legura.

Čelični klipovi podnose više temperature (za 180°C) od aluminijumskih, a zbog mnogo veće čvrstoće, može osovinica klipa biti manjeg prečnika i dužine pa je ukupna masa čeličnog klipa i osovinice približno jednaka onoj od aluminijuma (Slika 3.11)



Slika 3.11. Čelični klip Mahle za dizel motor teretnog vozila



Slika 3.12. Čelični klip Federal Mogula za dizel motor teretnog vozila

Na slici 3.12. prikazan je čelični klip Federal Mogula za dizel motor teretnog vozila izrađen je tako da su gornji i donji dio zavareni trenjem kako bi se dobio kanal za ulje za hlađenje klipa. Na slici desno je pokazan sistem za hlađenje klipa mlazom ulja iz brizgaljke na unutrašnjoj strani bloka motora, priključene na sistem za podmazivanje.

Dvije funkcije klipnih prstenova (karika), zaptivanje cilindra i podmazivanje između klipa i cilindra daju i dvije vrste prstenova: kompresioni i uljni. Osnovni zadaci klipnih prestenova su: zaptivanje prostora sagorijevanja, odvođenje toplote od klipa na cilindarsku košuljicu i regulacija uljnog filma za podmazivanje. Kompresioni prsten učestvuje u formiranju prostora za sagorijevanje pa se vrlo intenzivmo grije i zato nije poželjan kontakt ulja sa kompresionim prstenom. Ovaj prsten nije dovoljno efikasan u zaptivanju tokom ekspanzije. Uljni prsten može dobro razmazivati ulje u kretanju klipa ka spoljašnjoj mrtvoj tački (SMT), ali nije dovoljno dobar u uklanjanju ulja ispod kompresionog prstena u kretanju klipa ka UMT. Stoga, između kompresionog i uljnog prstena najčešće se nalazi i jedan prsten koji ima dvije funkcije -

kombinovani prsten, sa gornje strane zaptiva kompresioni prostor zajedno sa kompresionim prstenom, a s donje strane skida ulje sa zida cilindra.

Osovinica klipa vezuje klip sa klipnjačom. Veza osovinice sa klipom i klipnjačom može biti pokretna (plivajuća) i u klipu i uklipnjači, ili samo u klipu, a u klipnjači je presovani sklop (čvrsta veza). Prednost plivajućeg u odnosu na presovani sklop je u većoj nosivosti i bezbednosti od zaribavanja. U slučaju ako osovinica zariba u maloj pesnici klipnjače, i dalje se okreće u ušicama klipa i obrnuto.

Materijal za izradu osovinice klipa su uglavnom čelici za cementaciju. Istraživanja i napredak su usmjereni u dva pravca – smanjiti trenje s ciljem smanjenja potrošnje goriva i smanjiti trošenje osovinice i ležaja radi povećanja trajnosti motora. U tom cilju primjenjuju se razne prevlake, posebno DLC prevlake - Diamnod Like Carbon. Ove prevlake pored smanjenja trenja i trošenja imaju i dobru otpornost prema koroziji. U novije vrijeme se rade i osovinice od keramike ali je veliki problem njena krtost (Slika 3.13).



Slika 3.13. Klip proizvođača Federal Mogul i osovinica prevučena sa DLC prevlakom

Lomovi osovinice klipa nastaju kao posljedica visokih opterećenja ali i zbog loše i nestručne montaže.

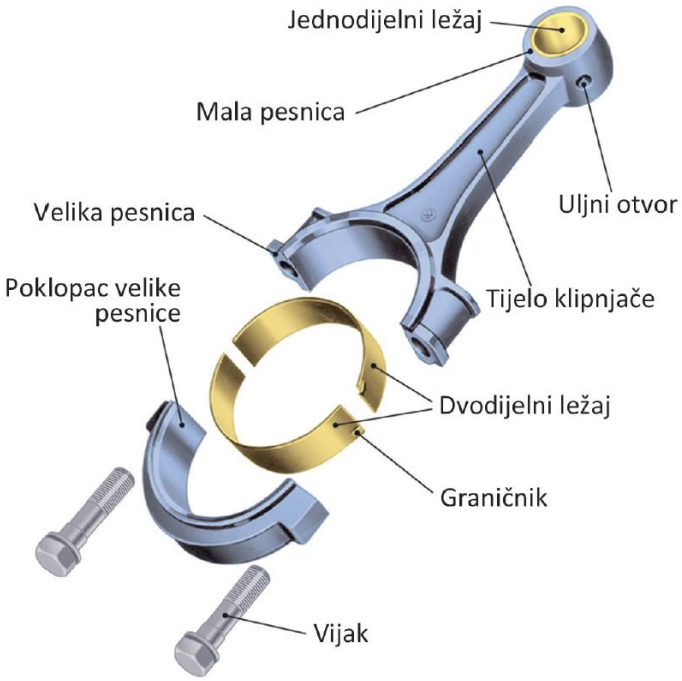
Sklop klipnjače povezuje klip i koljenasto vratilo i omogućuje pretvaranje pravolinijsko – oscilatornog kretanja klipa u obrtno kretanje koljenastog vratila. Elementi su: mala i velika pesnica, tijelo klipnjače i ležaji (Slika 3.14). U maloj pesnici je jednodijelni klizni ležaj, a u velikoj pesnici dvodijelni klizni ležaj.

Klipnjača sa poklopcem (dvodijelna) se koristi kod četverotaktnog motora. Izrađuju se glodanjem, livenjem, kovanjem i sinterovanjem.

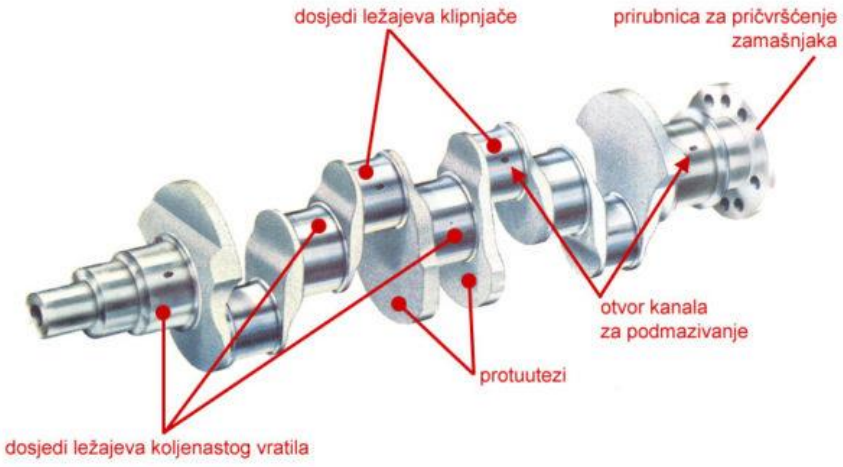
Koljenasto vratilo sa zamajcem (Slika 3.15) učestvuje u pretvaranju jednog oblika kretanja u drugi, odnosno vrši prenos obrtnog momenta i spada u najodgovornije, najsloženije i najviše opterećene dijelove motora. Prima sile od klipnjače i prenosi ih na zamajac, omogućava dovod ulja za podmazivanje velike pesnice klipnjače, pogoni elemente sistema za razvod radne materije i drugih sistema.

Za pravilno funkcionisanje koljenastog vratila moraju biti ispunjeni sljedeći zahtjevi:

- Ne smije doći do loma materijala usljed zamora na cijelom randomm području,
- Deformacije radilice (koljenastog vratila) ne smiju biti suviše velike,
- Ne smije se dozvoliti postojanje visokih amplituda torzionih i zavojnih vibracija.

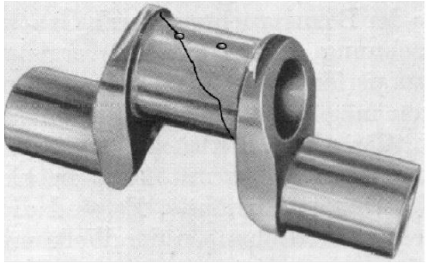


Slika 3.14. Klipnjača sa sastavnim dijelovima (Milašinović i Knežević, 2010)

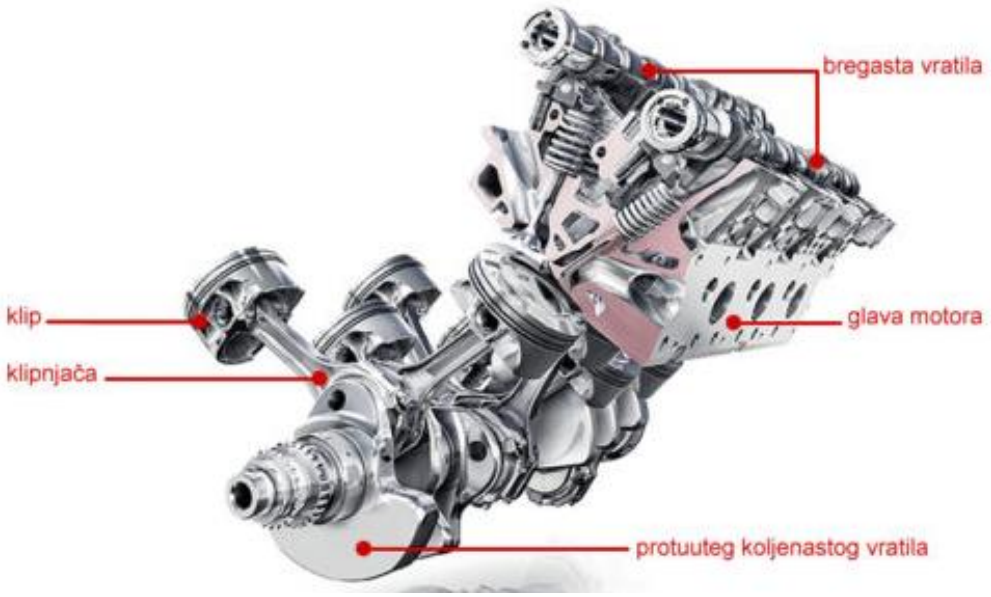


Slika 3.15. Koljenasto vratilo (radilica) sa prirubnicom za pričvršćivanje zamajca (Milašinović i Knežević, 2010)

Lom radilice usljed zamora materijala (Slika 3.16) započinje od inicijalne pukotine koja može biti površinska (potiče od mehaničke ili termičke obrade) ili unutrašnja (nastala pri kovanju).



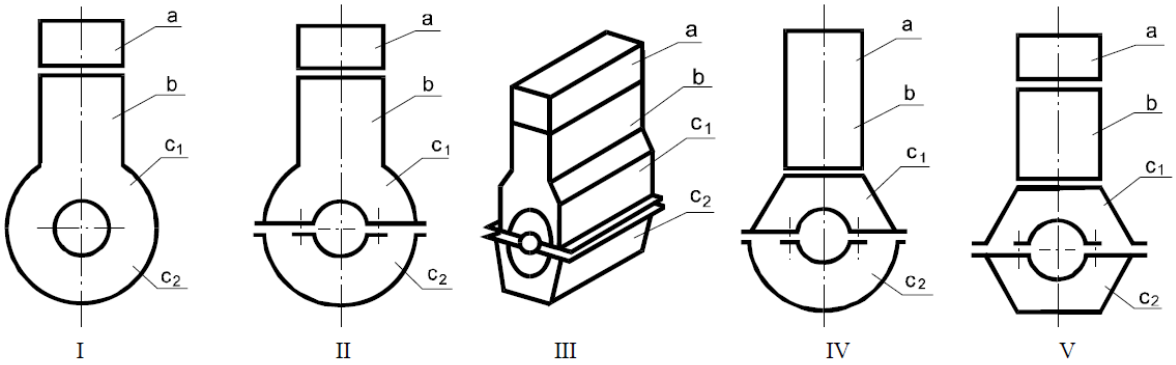
Slika 3.16. Lom radilice usljed zamora materijala



Slika 3.17. Kovano koljenasto vratilo V8 motora (Mercedes-Benz AMG) (Milašinović i Knežević, 2010)

Osnovni nepokretni dijelovi motora su (Slika 3.18):

- Cilindarska glava (a),
- Blok motora (b),
- Gornji dio motorske kućice - kartera (c1),
- Donji dio motorske kućice - kartera (c2).

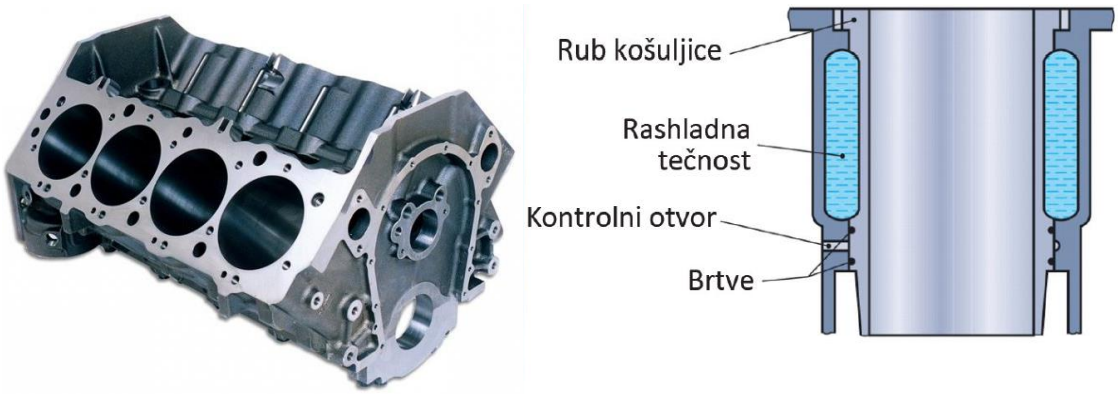


Slika 3.18. Forme gradnje nepokretnih dijelova motora, I - tunelska gradnja, II I III - gradnja blok-karter, IV - gradnja blok-glava, V - gradnja blok motora velikih snaga (Filipović, 2006)

Blok motora sa cilindarskim košuljicama (Slika 3.19) je osnovni dio motora koji prima i prenosi sve inercione sile na oslonce motora. Kod konstrukcije bloka treba uzeti u obzir sljedeće zahtjeve:

- Velika krutost i male deformacije,
- Minimalna težina, male dimenzije, velika kompaktnost,

- Mogućnost jednostavne i lagane ugradnje bregastog vratila i ostalih elemenata razvoda,
- Mogućnost dobrog i ravnomjernog hlađenja.



Slika 3.19. Blok motora (lijevo) i sklop košuljice cilindra sa blokom motora (desno), (Milašinović i Knežević, 2010)

Cilindarska glava ima osnovni zadatak da hermetički zatvori prostor u kojem se odvija proces sagorijevanja. Njen dizajn u velikoj mjeri zavisi od oblika prostora za sagorijevanje, rasporeda ventila, brizgalica i svjećica, kao i od konfiguracije usisnih i izduvnih kanala, vanjskih dovodnih cijevi i smjera tečenja rashladne tečnosti. Visoka krutost cilindarske glave je neophodna zbog opterećenja kojima je izložena tokom rada. Iz tog razloga se glava često izrađuje zasebno za svaki cilindar ili za par cilindara, dok se, rjeđe, izrađuje kao jedinstvena komponenta za cijeli motor, što je karakteristično za male motore. Njena konstrukcija u velikoj mjeri zavisi od vrste rashladnog sistema.

Karter, poznat i kao motorska kućica (Slika 3.20), zajedno s blokom motora, čini osnovnu potporu za rad krivajnih mehanizama. Ova komponenta mora biti dovoljno kruta, ali i kompaktna po dužini, što se uzima u obzir prilikom njenog dizajniranja. Kod motora za motorna vozila, karter se obično izrađuje kao dvodijelna struktura, pri čemu je njegov gornji dio izliven zajedno s blokom motora, formirajući tzv. blok-karter.



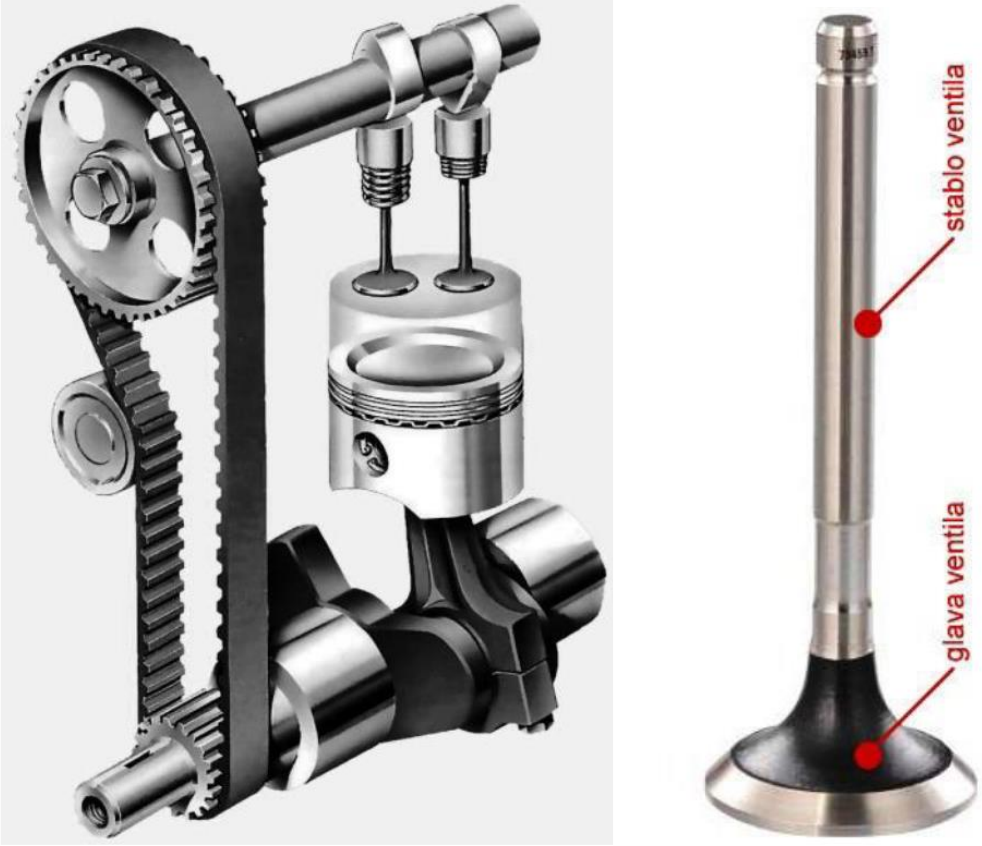
Slika 3.20. Motorska kućica-karter

Donji dio kartera ima funkciju uljnog korita i najčešće se izrađuje od presovanog lima debljine 1 do 1,5 mm. Njegova konstrukcija uključuje prirubnicu ojačanu duž cijelog obima čvršćom limenom trakom. Kod nekih motora, donji dio kartera izrađuje se livenjem, najčešće od sivog

liva ili aluminijumskih legura. U motorima vozila, ovaj dio je često opremljen rebrima za hlađenje, čime se unapređuje odvođenje toplote iz ulja za podmazivanje koje se u njemu skuplja (Filipović, 2016).

3.3. Sistem razvoda radne materije

Razvodni mehanizam predstavlja skup elemenata koji omogućavaju pravovremeno ubacivanje smjese goriva i vazduha u odgovarajući cilindar kod OTO motora, odnosno samo vazduha kod dizel motora. Takođe, osigurava pravovremeno izbacivanje sagorjelih gasova iz cilindra u određenom taktu i redoslijedu. Njegova osnovna funkcija je omogućavanje izmjene radne tečnosti u cilindru na kraju svakog radnog ciklusa. Kod četverotaktnih motora razvod radne tečnosti obavlja se pomoću ventila, bregastog vratila i elemenata za prenos pomjeranja sa brijega na ventil, što je danas standardna praksa. Kod dvotaktnih motora, međutim, koristi se zasunski razvod, pri čemu ulogu zasuna često preuzima sam klip, ili kombinovani zasunsko-ventilski razvod.



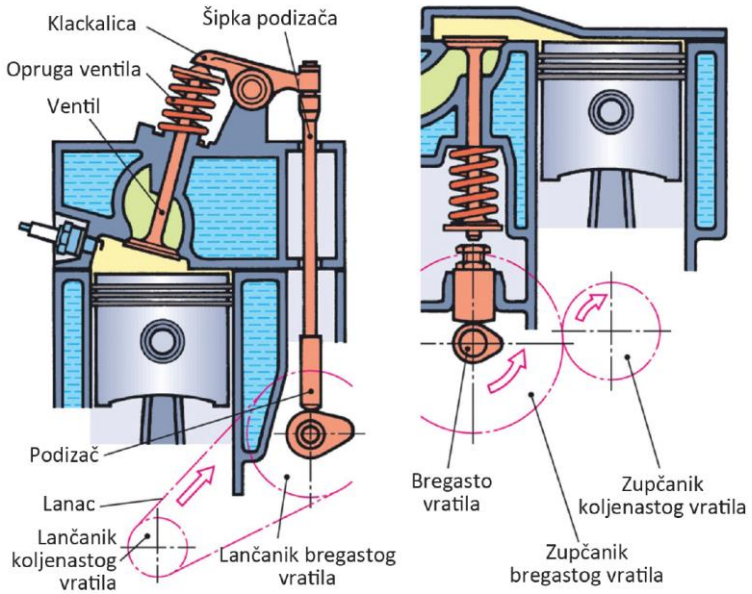
Slika 3.21. Prikaz razvoda ventila (lijevo) i ventil (desno)

Na slici 3.21. je prikazan najrašireniji i najjednostavniji razvod ventila sa jednim bregastim vratilom smještenim iznad cilindra (vratilo iznad glave) i dva ventila po cilindru. Razvod ventila omogućava pravovremeno otvaranje i zatvaranje ventila. Za razliku od ostalih pokretnih dijelova koji imaju kružno kretanje, ventili se kreću pravolinijski.

Hod ventila je većinom stacionaran, iako postoji i varijabilno upravljanje ventilima kod kojeg je moguće regulisati ranije ili kasnije otvaranje i zatvaranje ventila, zavisno od režima rada.

Otvaranje ventila omogućava bregasto vratilo, koje svojom rotacijom pretvara kružno kretanje u pravolinijsko pomjeranje ventila. Brijeg bregastog vratila u tačno određenom trenutku i na određeno vrijeme potiskuje ventil, čime se omogućava pravilno usisavanje i izduvavanje. Zatvaranje ventila obezbjeđuje opruga koja ga vraća u početni položaj. Vrijeme otvaranja ventila direktno zavisi od brzine rotacije koljenastog vratila (radilice), s kojim je bregasto vratilo povezano mehaničkim putem. Ova veza se ostvaruje zupčastim remenom, lancem ili zupčanikom, pri čemu koljenasto vratilo pokreće bregasto vratilo.
Standardni sistem ventilskog razvoda (Slika 3.22.) obično obuhvata sljedeće komponente: ventilni sklop, bregasto vratilo, pogonske elemente bregastog vratila, elemente za prenos kretanja od brijega bregastog vratila do ventila (poput podizača, šipke podizača i klackalice) te elemente za regulaciju zazora ventila.

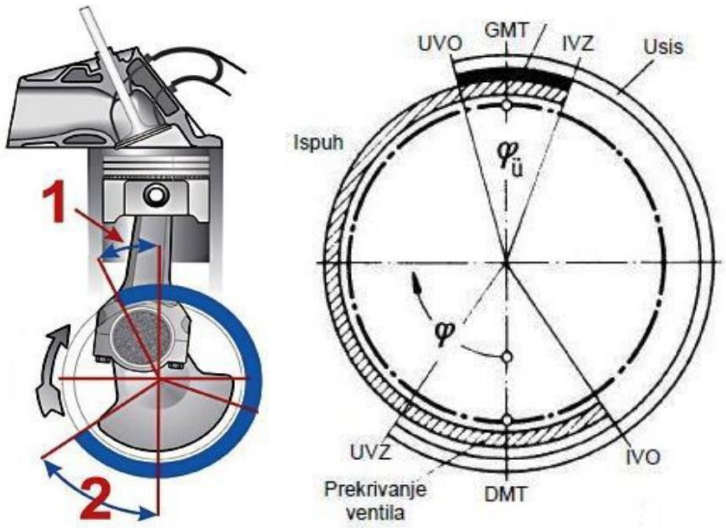
Konstrukcija pojedinih komponenata zavisi od više faktora, uključujući položaj ventila, koji mogu biti smješteni u bloku ili u glavi motora, kao i od njihovog rasporeda, bilo u liniji ili pod određenim uglom. Takođe, broj ventila po cilindru, koji može iznositi dva, tri, četiri ili pet, značajno utiče na dizajn.
Osim toga, važni faktori su broj i položaj bregastih vratila, koja mogu biti jedna ili više, smještena u bloku ili glavi motora. Vrsta pogona bregastog vratila, koja često zavisi od njegovog položaja, takođe ima ključnu ulogu u konstrukciji ovih komponenti.



Slika 3.22. Sistem za razvod radne materije: Viseći ventili (lijevo), stojeći ventili (desno) (Milašinović i Knežević, 2010)

Najčešće izvedbe obuhvataju:

- Dva ventila po cilindru (jedan usisni i jedan izduvni) s jednim bregastim vratilom,
- Četiri ventila po cilindru (dva usisna i dva izduvna) s dva bregasta vratila,
- Motore s tri ili pet ventila po cilindru, koji se zbog složenosti konstrukcije veoma rijetko koriste.



Slika 3.23. Termin uglova i dijagram upravljanja ventilima 4T (Medica, 2006)

Slika 3.23 ilustruje pojam ugla početka otvaranja ventila, uključujući mogućnost otvaranja ventila prije GMT-a (pozicija 1) i zatvaranja nakon DMT-a (pozicija 2). Na slici je prikazan dijagram rada ventila kod četverotaktnog motora, koji uključuje faze otvaranja i zatvaranja. Usisni ventil počinje da se otvara neposredno prije GMT-a (UVO), kako bi što ranije tokom faze usisavanja dostigao punu otvorenost. U trenutku blizu GMT-a, istovremeno su otvoreni i usisni i izduvni ventil, a ova faza se naziva prekrivanje ili preklapanje ventila. Preklapanje omogućava efikasno ispiranje kompresionog prostora, čime se poboljšava volumetrijski stepen iskorištenja i smanjuje termičko opterećenje dijelova motora.

Izduvni ventil ostaje otvoren i nakon GMT-a, a zatvara se s određenim zakašnjenjem (IVZ). Ovaj ugao prekrivanja ϕ direktno utiče na stepen dobave, a time i na performanse motora. Veće prekrivanje ventila obezbjeđuje veći obrtni moment u rasponu viših brzina rotacije. Nakon zatvaranja izduvnog ventila (IVZ), započinje faza čistog usisavanja.

$\phi_{preklapanja}=\phi_{IVZ}-\phi_{UVO}$ - ugao preklapanja otvorenosti ventila

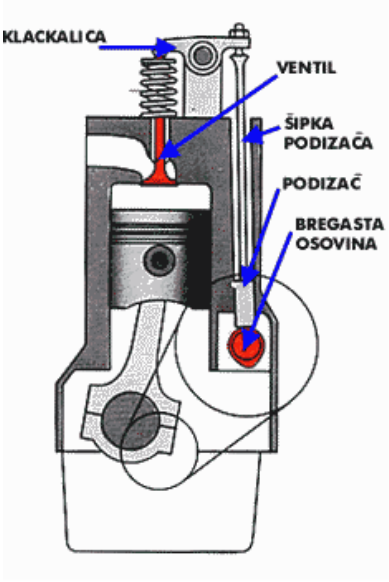
Prema položaju bregastog vratila i ventila razlikuju se različiti tipovi ventilskog razvoda, pri čemu su najčešće korišćeni OHC i DOHC sistemi:

- OHC (Over Head Camshaft): Jedno bregasto vratilo je smješteno iznad glave motora, dok su ventili viseći.
- DOHC (Double Over Head Camshaft): Dva bregasta vratila nalaze se iznad glave motora, a ventili su takođe viseći.
- OHV (Over Head Valve): Bregasto vratilo se nalazi u bloku motora, dok su ventili viseći i postavljeni u glavi motora.
- SV (Standing Valve): Kod ovog sistema, i bregasto vratilo i ventili nalaze se u bloku motora.
- IOE (Inlet Over Exhaust): Bregasto vratilo je smješteno u bloku motora, dok je usisni ventil viseći, a ispušni stojeći, smješten ispod usisnog.
- CIH (Camshaft In Head): Bregasto vratilo je pozicionirano u glavi motora, a ventili su viseći.

- CVH (eng. compound valve-angle hemispherical chamber – ventili pod složenim kutom raspoređeni u kuglastom prostoru). Bregasto vratilo je iznad glave motora, ventili su viseći.

Kod motora s parnim brojem ventila, poput onih s dva ventila (jedan usisni i jedan izduvni) ili četiri ventila (dva usisna i dva izduvna), usisni ventili su obično većeg prečnika. To je zbog činjenice da je usisavanje radne smjese pod potpritiskom zahtjevnije nego izbacivanje gasova klipom iz cilindra. Kod motora s neparnim brojem ventila, poput onih s tri ventila (dva usisna i jedan izduvni) ili pet ventila (tri usisna i dva izduvna), usisni ventili su manjih dimenzija, ali ukupni usisni razvodni presjek ostaje veći od izduvnog. Bez obzira na broj ventila, usisni razvodni presjek je u pravilu veći od izduvnog, kako bi se optimizovalo punjenje cilindra radnom smjesom.

Kada je bregasto vratilo udaljeno od koljenastog vratila, pogon se ostvaruje pomoću lančanika i lanca ili nazubljenog remena sa remenicama. Lančanik na bregastom vratilu ima dvostruko više zubaca od lančanika na koljenastom vratilu. U slučaju kada su koljenasto i bregasto vratilo relativno blizu, njihova sinhronizacija se postiže postavljanjem oznaka na lančanicima tako da budu usklađene, formirajući pravac koji prolazi kroz ose oba vratila.



Slika 3.24. Ventil i klackalica

Ventilski sklop sastoji se od ventila, opruga i osigurača. Njegova osnovna funkcija je regulacija punjenja cilindra radnom smjesom i ispuštanja sagorjelih gasova. Bregasto vratilo, koje je povezano s koljenastim vratilom pomoću zupčastog kaiša, omogućava otvaranje ventila u precizno definisanim trenucima. Ovo se postiže brijegovima na bregastom vratilu koji djeluju na klackalicu, otvarajući odgovarajući usisni ili izduvni ventil.

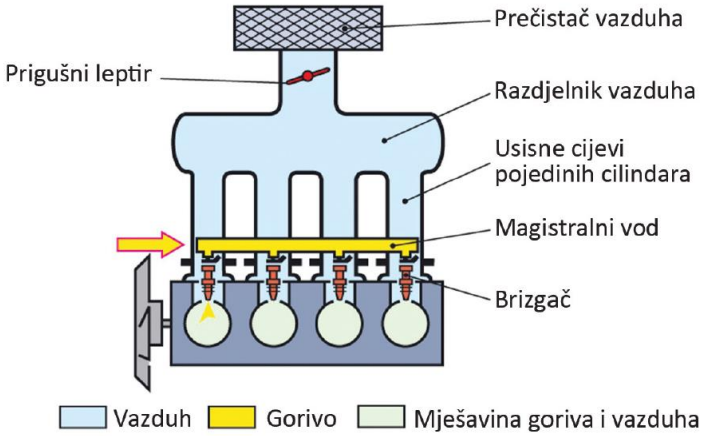
Tokom jednog ciklusa rada motora, svaki ventil se otvori samo jednom, što znači da se bregasto vratilo obrne jednom u tom periodu, dok se koljenasto vratilo obrne dva puta.

Zatvaranje ventila obezbjeđuje opruga, a ventil mora savršeno naleći na svoje sjedište kako bi prostor za sagorijevanje ostao potpuno hermetički zatvoren.

3.4. Sistem za napajanje motora gorivom

Različiti su sistemi dobave goriva kod benzinskih i dizel motora zbog različitog načina pripreme i paljenja smješe. U benzinskim motorima mogu da sagorijevaju: benzin, metanol ili gas. Moguće je vanjsko ili unutrašnje stvaranje smješe vazduha i goriva koja se pali vanjskim izvorom energije. Homogena smjesa goriva i vazduha u taktu kompresije zagrijava se na 400-500°C. Kako je ta temperatura niža od tačke samopaljenja, smješa se mora zapaliti električnom varnicom.

U slučaju vanjskog stvaranja smješe mješavina goriva i vazduha se počinje stvarati već u usisnoj grani, tj. izvan cilindara (motori s karburatorom ili indirektnim ubrizgavanjem). Mješavina goriva i vazduha se stvara u cilindru (motori s direktnim ubrizgavanjem) u slučaju unutrašnjeg stvaranja smješe (Slika 3.25) Pri tom se može postići tzv. slojevito punjenje: smjesa bogata u okolini svjećice, a siromašna u zonama udaljenim od svjećice. Ovakav sistem pripreme smješe kod benzinskih motora se primjenjuje kod novijih motora elektronski kontrolisanih. Na ovaj način je pokazano da benzinski motori rade sa homogenom mješavinom.



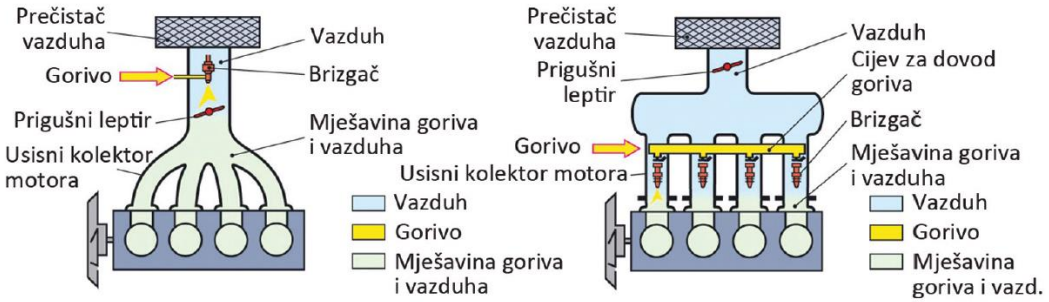
Slika 3.25. Direktno ubrizgavanje benzina u cilindar motora (Milašinović i Knežević, 2010)

U slučaju vanjskog stvaranja smješe (Slika 3.26), indirektni sistemi za ubrizgavanje benzina se mogu podijeliti na (Milašinović i Knežević, 2010):

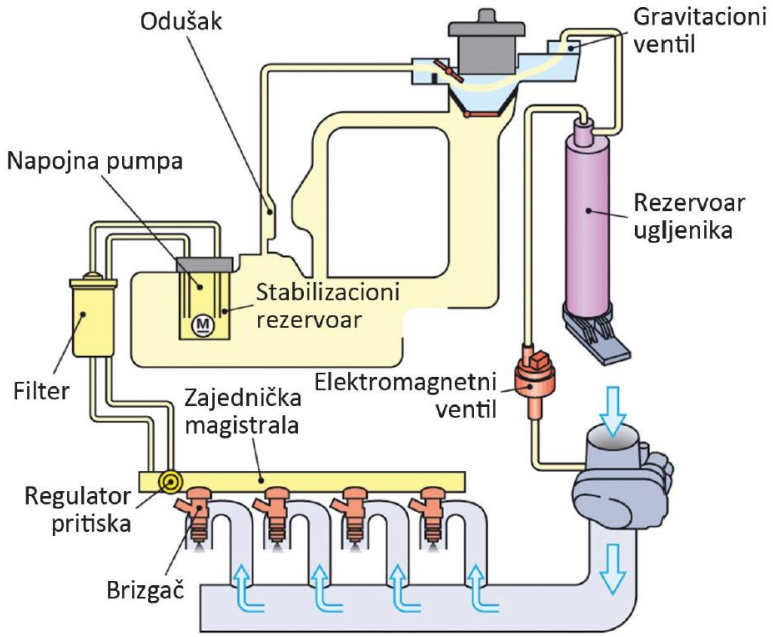
- Sisteme ubrizgavanja benzina u usisne vodove u oblasti usisnog ventila. Na usisnim vodovima svakog cilindra, najčešće neposredno ispred ulaza u glavu motora, postavljeni su brizgači za svaki cilindar posebno (pojedinačno ubrizgavanje). Svi brizgači se napajaju gorivom iz zajedničkog magistralnog voda koji se proteže duž motora (eng. MPI – *Multi Point Injection*) i
- Sisteme centralnog ubrizgavanja benzina. U ovom slučaju ubrizgavanje se vrši centralno za sve cilindre motora pomoću jednog brizgača, pa se u tehničkoj praksi koristi termin SPI – sistem ubrizgavanja (eng. *Single Point Injection*). Brizgač je

postavljen ispred leptira, a formirana smješa se razvodi do pojedinih cilindara usisnim kolektorom, slično kao kod karburatorskog sistema.

Osnovni dijelovi sistema dovoda goriva kod benzinskih motora su: rezervoar goriva, cijevi za gorivo, prečistač goriva, pumpa goriva, regulator pritiska, regeneracioni ventil i filter s aktivnim ugljenikom (Slika 3.27). Pomoću pumpe goriva, gorivo se dovodi od rezervoara preko cijevi i prečistača do zajedničke magistrale, a vazduh se preko usisnog sistema dovodi do motora (Slika 3.27). Gorivo se ubrizgava u struju vazduha prije usisnih ventila. Odatle se pripremljena mješavina gorivo-vazduh vodi do cilindra motora. Pomoću elektronike se obavlja regulacija mješavine.



Slika 3.26. Indirektno ubrizgavanje benzina, lijevo -centralno, desno-pojedinačno za svaki cilindar (Milašinović i Knežević, 2010)



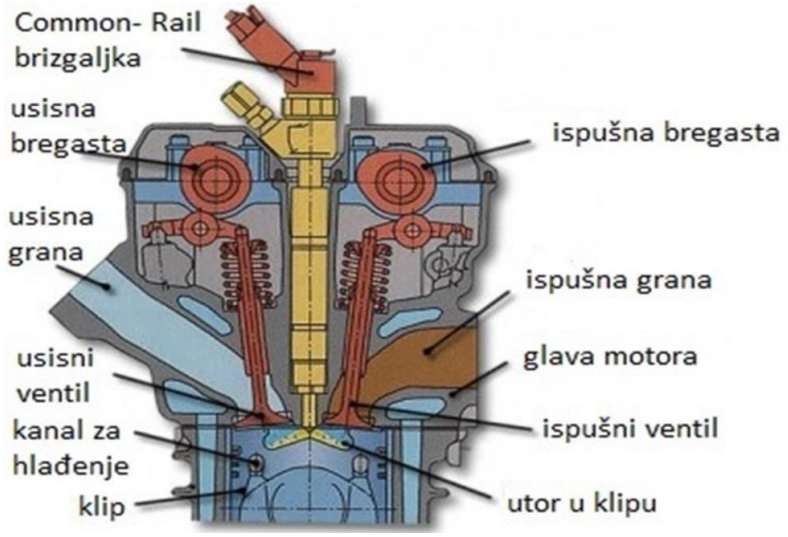
Slika 3.27. Sistem dovoda goriva (Milašinović i Knežević, 2010)

Dizel motor uvijek radi sa unutrašnjim stvaranjem smješe i samopaljenjem. Usisava i potom komprimira samo vazduh. Tačno određena količina goriva se pod visokim pritiskom ubrizgava u zagrijan komprimovani vazduh. Gorivo se pali usljed visoke temperature vazduha.

Motori s direktnim ubrizgavanjem goriva karakterišu se većim radnim učinkom, što dovodi do smanjene potrošnje goriva. Kod ovih motora, injektor ubrizgava gorivo direktno u cilindar, tačnije u ekspanzioni prostor, koji se nalazi unutar samog klipa. Na Slici 3.28. prikazan je način

na koji je formiran ekspanzioni prostor u klipu. Ovakvi motori najčešće se koriste u komercijalnim vozilima, dok su u putničkim vozilima manje zastupljeni (Marin, 2015).

Dizel motori s direktnim ubrizgavanjem ne zahtijevaju uređaj za hladni start. Međutim, grijači se ugrađuju kako bi se smanjila emisija štetnih gasova tokom startovanja hladnog motora i u fazi njegovog zagrijavanja.Karakteristike motora sa direktnim ubrizgavanjem su: veća ukupna korisnost, veća buka, vibracije i tvrd rad motora, manja specifična potrošnja goriva, potreban viši pritisak ubrizgavanja, lako startanje hladnog motora, jeftinija i jednostavnija konstrukcija glave motora, visoka mehanička i termička naprezanja (Marin, 2015).



Slika 3.28. Dizel motor sa direktnim ubrizgavanjem

Motori s direktnim ubrizgavanjem goriva danas dominiraju u ponudi dizel automobila na tržištu. Postoji nekoliko vrsta ovih motora, uključujući klasično, singl i common rail direktno ubrizgavanje. Zajednička karakteristika svih varijanti je prisustvo ubrizgivača koji se postavlja direktno na glavu motora, pri čemu svaki cilindar ima svoj ubrizgivač. Razlike između tipova proizlaze iz konstrukcije i tehnologije ubrizgivača, načina dovoda goriva i lokacije pumpe koja stvara potreban pritisak za ubrizgavanje goriva u cilindar.

Neke od komercijalnih oznaka dizel motora s direktnim ubrizgavanjem su: CDI (Common Rail Direct Injection), DTI (Direct Turbo Injection), CDTI (Common Rail Diesel Turbo Injection), CRDi (Common Rail Direct Injection), dTi (Direct Turbo Injection), dCi (Diesel Common Rail Injection), DDIS (Diesel Direct Injection System), Hdi (High Pressure Direct Injection) i i-CTDi (Intelligent Common Rail Turbo Diesel Injection). Kod common rail sistema gorivo se najprije sabija i skladišti pod visokim pritiskom, a zatim se ubrizgava u cilindar u precizno određenom trenutku. Common rail sistem je visokopritisni sistem ubrizgavanja regulisan elektronski, s glavnom cijevi koja opskrbljuje gorivom sve cilindre. Funkcioniše na principu odvajanja procesa stvaranja pritiska od procesa ubrizgavanja. Konstantan pritisak stvara zasebna pumpa, a gorivo se skladišti i distribuira putem razdjelne cijevi. Ubrizgivači, povezani s ovom cijevi, gorivom snabdijevaju cilindre preko kratkih vodova. Upravljačka jedinica koordinira proces, upravljajući tačnim početkom i završetkom ubrizgavanja na osnovu podataka prikupljenih od različitih senzora. Pritisak ubrizgavanja u common rail sistemima postepeno je povećavan: prva generacija radila je na 1350 bara, druga na 1600 bara, treća na 2000 bara,

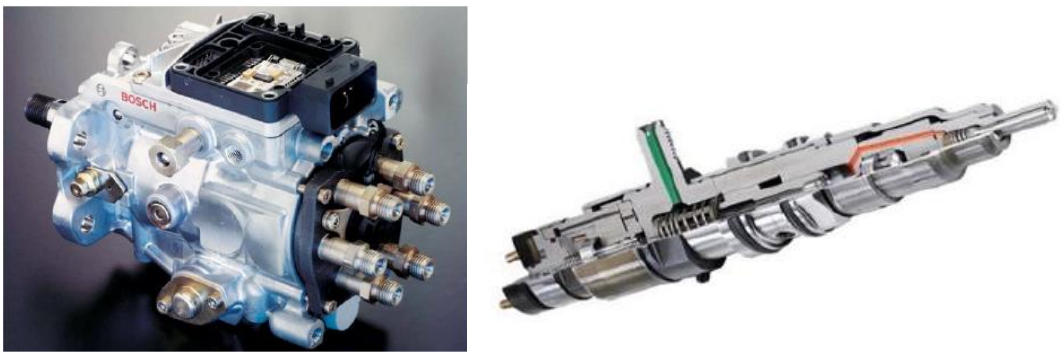
dok najnoviji sistemi dosežu pritisak od 2500 bara (Popović, 2006). Bosch je 1997. godine predstavio prvi common rail sistem, nazvan prema zajedničkoj cijevi visokog pritiska koja opskrbljuje sve cilindre gorivom. Za razliku od konvencionalnih sistema, gdje se pritisak stvara za svako ubrizgavanje posebno, common rail omogućava stalno prisustvo goriva pod potrebnim pritiskom, spremnog za ubrizgavanje u bilo kojem trenutku.



Slika 3.29. *Common rail* sistem ubrizgavanja goriva

Osnovni dijelovi *Common Rail* sistema su (Popović, 2006):

- Niskonaponski krug obuhvata krug dobavnog pritiska, pred-dobave i povrat goriva. Glavni dijelovi ovog sistema uključuju rezervoar goriva, uređaje za predgrijavanje goriva, dobavnu pumpu, filter goriva, električni isklopni ventil i hladnjak.
- Visokonaponski krug čini visokonaponska pumpa, cijevi visokog pritiska, rail i brizgaljke postavljene na svaki cilindar.
- Elektronika u ovom sistemu obuhvata upravljački sklop, senzore, magnetne ventile brizgaljki, isklopni ventil i senzor pritiska common rail-a.



Slika 3.30. Visokonaponska pumpa (VT) i brizgaljka kod *Common rail* sistema ubrizgavanja goriva

Prednosti Common Rail sistema ubrizgavanja u odnosu na druge sisteme uključuju:

- Ubrizgavanje se vrši elektromagnetskim ventilima, što omogućava potpuno slobodan izbor početka, kraja i trajanja ubrizgavanja, bez ograničenja koja proizlaze iz geometrijskog oblika brijega, kao što je slučaj kod sistema s mehaničkim ubrizgavanjem.

- Pritisak ubrizgavanja ostaje konstantan tokom cijelog procesa ubrizgavanja, od početka do kraja.
- U jednom radnom ciklusu motora, gorivo se može ubrizgati više puta, čime se optimizuje sagorijevanje.
- Visokotlačna pumpa ne mora biti sinhronizovana s koljenastim vratilom motora, što omogućava veću fleksibilnost u radu sistema (Popović, 2006).

3.5. Sistem za paljenje smješe

Kod svih benzinskih motora smješa u cilindru se pali električnom varnicom u tačno određenom trenutku. Osnovni dijelovi sistema za paljenje smješe u benzinskim motorima, (Slika 3.31) su:

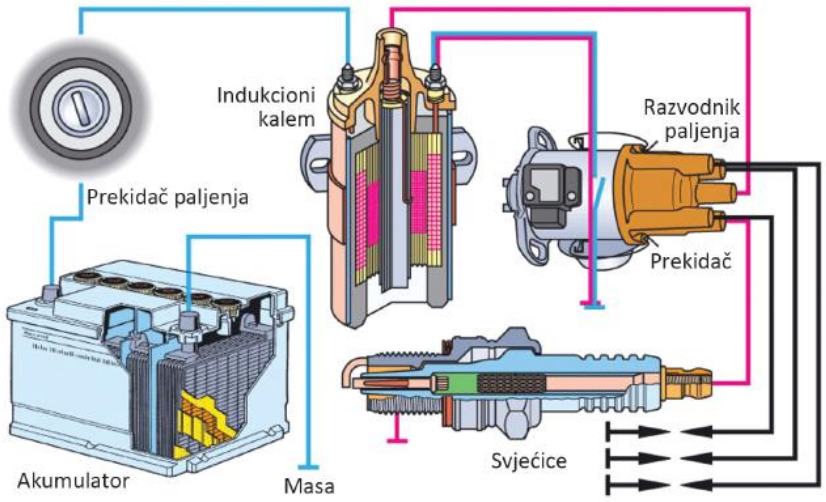
- Baterija (akumulator),
- Indukcioni kalem (bobina),
- Razvodnik paljenja sa prekidačem i ragulatorom ugla pretpaljenja,
- Nisko i visokonaponski vodovi i
- Svjećice.

Sistema za paljenje ima osnovne zadatke:

- Da obezbjedi varnicu na elektrodama svjećice koja će pouzdano upaliti smješu u svim radnim uslovima i
- Da, zavisno od uslova rada i radnog režima, upali smješu u optimalnom trenutku.

Sistemi za paljenje smjese mogu se klasifikovati prema izvoru električne energije na:

- Magnetno paljenje – Ovaj sistem se najčešće koristi na manjim motociklističkim motorima, malim agregatnim motorima i vanbrodskim motorima. Energija potrebna za rad sistema stiče se indukcijom putem magneta, koji direktno proizvodi visoki napon potreban za paljenje smjese. U ovom sistemu nije potrebna baterija.
- Baterijsko paljenje – Energija za rad ovog sistema dolazi iz baterije (akumulatora), dok se visok napon proizvodi transformacijom unutar indukcionog kalema. Baterijski sistem paljenja koristi električnu energiju iz akumulatora, od kojeg je i dobio ime. Ovaj sistem se sastoji od indukcionog kalema (bombine), prekidača paljenja (s kontaktima ili bez njih), kondenzatora razvodnika i svjećica. Baterijsko paljenje je uvedeno krajem 19. vijeka i njegov osnovni princip nije se značajno mijenjao do danas.



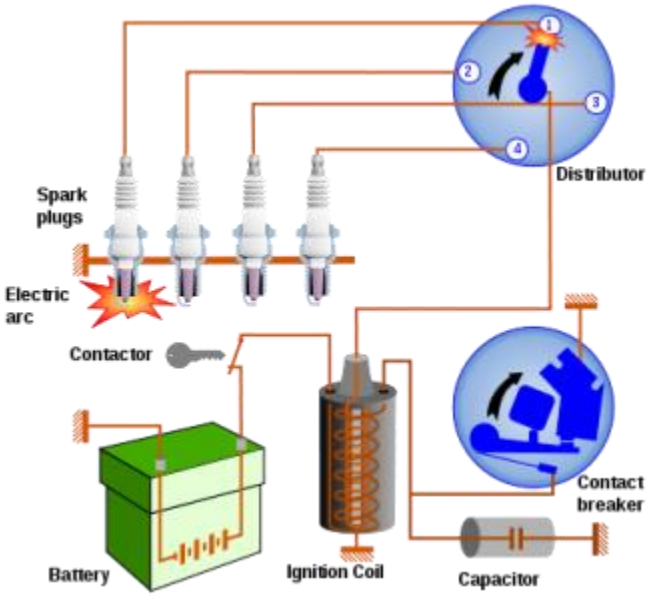
Slika 3.31. Sistem za paljenje smješe kod benzinskih motora - baterijsko paljenje (Milašinović i Knežević, 2010)

Na Slici 3.31. prikazana je shema sistema baterijskog paljenja smjese za benzinske motore. Ovaj sistem uključuje dva kola struje: jedno kolo niskog napona (poznato i kao primarno kolo) i drugo kolo visokog napona (sekundarno kolo). Kolo niskog napona započinje od pozitivnog pola akumulatora i vodi preko kontaktnog ključa (glavni prekidač za aktiviranje sistema) prema balastnom otporniku, koji je povezano s primarnim namotajem indukcionog kalema. Dalje, struja prolazi kroz prekidač do mase, čime se zatvara ovaj krug. Uz kontakte prekidača, upareno je i paljenje kondenzatora.

Nastanak varnice za paljenje

Snaga za rad OTO motora dobija se sagorevanjem smjese benzina i vazduha, a potrebnu električnu iskru za paljenje pruža sistem za paljenje. Svaki cilindar obično ima jednu svjećicu koja je postavljena tako da njene elektrode ulaze u prostor za sagorijevanje. Kada napon na svjećici dostigne dovoljno visoku vrijednost, električna struja prelazi razmak između elektroda, stvarajući iskru koja pokreće paljenje. Ostali dijelovi sistema za paljenje imaju zadatak da u svakom cilindru isporuče potreban napon za paljenje u precizno određenom trenutku.

Da bi se stvorila iskra, veći razmak između elektroda zahtijeva veći napon. Iskra mora biti dovoljno snažna da sigurno zapali smjesu benzina i vazduha, a intenzitet iskre zavisi od razmaka između elektroda, koji je obično postavljen na 0,7 mm. Napon na svjećici mora biti visok, minimalno 14.000 V, ali zbog gubitaka tokom prijenosa, sistem za paljenje mora osigurati napon od oko 30.000 V. Pošto je standardni napon akumulatora 12 V, to nije dovoljno za paljenje, pa je potrebno da uređaj za paljenje poveća ovaj napon nekoliko hiljada puta u indukcionom kalemu. Napon se potom prenosi na svjećice u pravom trenutku zahvaljujući razvodniku paljenja, koji usmjerava struju visokog napona na cilindre prema određenom redoslijedu. Mehanički prekidač (platine), zajedno s indukcionim kalemom, omogućava stvaranje visokog napona, dok kondenzator povezan s prekidačem sprječava stvaranje štetnih iskri između kontakata platina.



Slika 3.32. Nastanak varnice za paljenje smješe kod OTO motora (Milašinović i Knežević, 2010)

Akumulator je uređaj koji pohranjuje električnu energiju, kojom napaja različite sisteme poput električnih pokretača, svjetala, signalizacije i drugih električnih potrošača. Sastoji se od nekoliko ćelija, svaka sa naponom od 2 volta, koje su povezane serijski pomoću metalnih letvi. Savremeni automobilski akumulatori obično imaju šest ćelija, što daje ukupni napon od 12 volti. Najveće opterećenje akumulator trpi prilikom pokretanja motora, dok generator električne energije u toku vožnje kontinuirano puni akumulator. Iako akumulator isporučuje napon od 12 volti, taj napon nije dovoljan za stvaranje iskrenje na svjećici koja je potrebna za paljenje smjese goriva i vazduha. Zbog toga je nužno povećati napon, što se postiže korištenjem indukcionog kalema (bobine), koji funkcioniše kao transformator. Struja koja prolazi kroz kalem stvara magnetno polje, a kada se to polje prekine, u električnom vodiču unutar tog polja nastaje indukovani napon. Napon se može povećati korištenjem dva namotaja, pri čemu jedan od njih ima znatno više navoja nego drugi. Indukcijski kalem se pravi sa štapićastim jezgrom od gvožđa koje je sačinjeno od limenih listova (lamela). Oko jezgra postavlja se sekundarni namotaj s 15.000 do 30.000 navoja tanke bakrene žice. Iznad njega se nalazi primarni namotaj, koji sadrži nekoliko stotina navoja deblje bakrene žice i služi kao niskonaponski namotaj.



Slika 3.33. Razvodnik paljenja

Kolo visokog napona počinje od sekundarnog namotaja indukcionog kalema, čiji je jedan kraj spojen s primarnim namotajem, a drugi kraj je povezan visokonaponskim kablovima koji vode struju do kape razvodnika paljenja. Kapa razvodnika zatim distribuira visok napon do elektroda svjećica. Bočne elektrode svjećica su povezane sa masom, čime se zatvara sekundarno kolo putem iskrenja između elektroda.

Kada se glavni prekidač uključi ključem, primarni namotaj se povezuje s pozitivnim polom akumulatora. Struja koja teče kroz primarni namotaj stvara magnetno polje u gvozdenom jezgru. Kada prekidač razdvoji kontakte, struja u primarnom namotaju se prekida, čime nestaje magnetno polje. Ovo izaziva indukciju u sekundarnom namotaju i stvara vrlo visoki napon. Taj visoki napon se dalje distribuira do svjećica u motoru putem razvodnika paljenja.

Razvodnik paljenja funkcioniše kao mehanička veza između električnih komponenti sistema paljenja i motora. Prekidač u razvodniku isključuje primarni strujni krug u tačno određenom trenutku kako bi izazvao paljenje. Razvodnik ima zadatak da raspodijeli visok napon sa indukcionog kalema na svjećice prema redoslijedu paljenja cilindara.

U kućištu razvodnika postavljen je prekidač čiji kontakti (platinska dugmad) otvaraju brijegovi na vratilu razvodnika, čime se prekida struja u primarnom namotaju. Nakon što brijeg prođe, opruga (najčešće fleksibilna) ponovo zatvara kontakte i struja se vraća u primarni krug. Broj brijegova na vratilu razvodnika odgovara broju cilindara motora, pa se kontakti otvaraju i zatvaraju proporcionalno broju obrtaja vratila. Gornji deo razvodnika, poznat kao kapa razvodnika, raspoređuje visok napon na svjećice, a izrađen je od izolacijskog materijala sa perifernim kontaktima koji su povezani visokonaponskim kablovima.

3.6. Sistem za podmazivanje motora

Prilikom rada motora SUS uvijek dolazi do trenja između susjednih dodirnih površina. Kao posljedica trenja dešava se porast temperatura površina koje su izložene trenju, što dalje dovodi do širenja materijala, a to uslovljava još veće trenje. Moglo bi se reći da je to začarani krug u kome će takav motor raditi dok snaga motora bude veća od sile trenja. Kada se snaga motora izjednači sa silom trenja motor će prestati sa radom (‘’zaribaće’’). Zadatak sistema za podmazivanje motora je i hlađenje elemenata motora i uklanjanje nastalih nečistoća i sedimenata izvan motora.



Slika 3.34. Podmazivanje motora

Kontinuirano podmazivanje dodirnih površina unutar motora od ključne je važnosti kako bi se smanjilo trenje i obezbijedila efikasnost rada motora. Dodirne površine uključuju klipno-cilindarski sklop, ležajeve koljenastog vratila, klipnjače i bregastog vratila, kao i ležajeve raznih međuosovina. Podmazivanje se vrši motornim uljem koje je specifično propisano od strane proizvođača motora. Pored smanjenja trenja, ulje poboljšava zaptivanje, doprinosi hlađenju motora prenoseći toplotu u kućište radilice i korito za ulje, sprečava koroziju i ispira ostatke sagorijevanja. Dovođenjem ulja do kliznih površina ležajeva i stvaranjem uslova za formiranje hidrodinamičkog sloja ulja u svim režimima rada motora, sprečava se zaribavanje delova, smanjuju energetski gubici usled trenja i obezbjeđuje se pravilna mikro geometrija dijelova tokom dužeg perioda. Pravilno podmazivanje znatno produžava vijek trajanja motora i poboljšava njegovu sigurnost u radu.

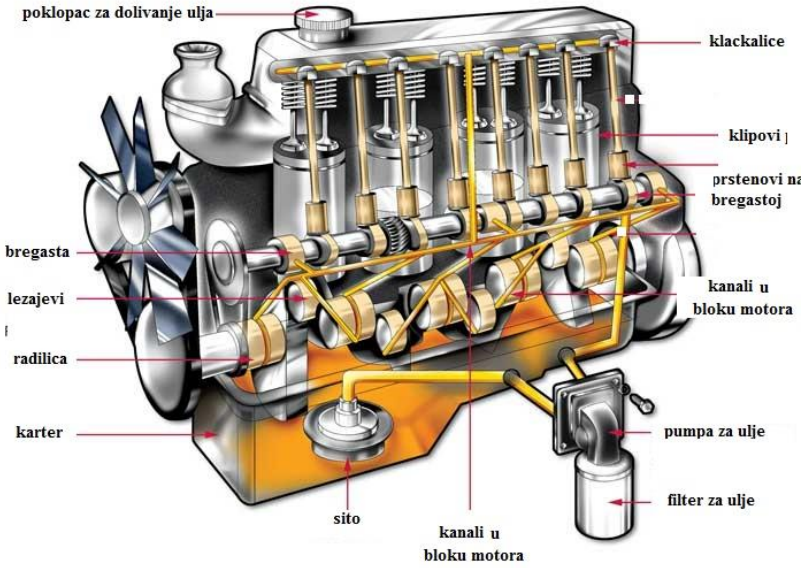
Osnovni zadaci sistema podmazivanja uključuju (Milašinović i Knežević, 2010):

- Smanjenje trenja između pokretnih kliznih površina, čime se minimiziraju štetne posljedice poput smanjenja efektivne snage i ekonomičnosti motora usljed povećanih mehaničkih otpora, habanja kliznih površina, porasta temperature u kliznim spojevima usled trenja i sl.
- Odvođenje toplote sa dijelova motora (kao što su klip, klipnjača i drugi delovi) koji teško dolaze u kontakt sa rashladnim sredstvom.
- Poboljšanje zaptivanja radnog prostora motora zahvaljujući postojanju uljnog sloja između klipa i cilindra.
- Čišćenje i spiranje gareži i taloga sa dijelova motora (cilindra, klipova, klipnih prstenova, žlijebova klipnih prstenova) što omogućava njihovu normalnu funkciju.
- Amortizacija udara pri burnom sagorijevanju usled postojanja uljnog sloja između kliznih površina.
- Zaštita od korozije usled dejstva kiselih taloga (kao što su sumporna jedinjenja) koji mogu dospjeti na metalne površine motora.

Vrste sistema podmazivanja uključuju:

- Prinudno ili cirkularno podmazivanje: Ovaj sistem podrazumijeva dovođenje ulja pod pritiskom do kliznih površina, što omogućava podmazivanje jače opterećenih dijelova, kao što su ležajevi koljenastog vratila, klipnjače, bregasto vratilo i klackalice.
- Podmazivanje prskanjem: Ovaj način podmazivanja uključuje prskanje ulja po kliznim površinama, što omogućava formiranje sloja maziva koji smanjuje trenje pri kontaktu dodirnih površina. Ulje se prska ili zahvata iz korita od strane klipnjače, što je karakteristično za starije, manje opterećene motore, ili se koriste posebne prskalice koje ravnomjerno raspršuju ulje po cilindrima i drugim kliznim površinama.
- Kombinovano podmazivanje: Ovaj sistem je najčešći u modernim motorima i kombinuje prinudno podmazivanje pod pritiskom i podmazivanje prskanjem. U njemu se jedan dio kliznih površina podmazuje pod pritiskom, dok se drugi dio podmazuje prskanjem, najčešće iz zazora ležaja koljenastog vratila, pri čemu ulje pod dejstvom centrifugalne sile prska po prostoru kućišta i podmazuje cilindre i druge klizne površine.

Kretanje motornog ulja prikazano na Slici 3.35 opisuje način na koji se ulje distribuira unutar motora. Potrebna količina motornog ulja smještena je u koritu za ulje, iz kojeg pumpa izvlači ulje kroz sito i potiskuje ga do glavnih ležajeva. Pumpa može transportovati između 8 i 12 litara ulja u minuti, a pritisak ulja se podešava putem specijalnog prelivnog ventila. Nakon što prođe kroz glavne ležajeve radilice, ulje se transportuje kroz kanale do ležajeva klipnjače. U nekim motorima, ulje se dalje distribuira do osovinica klipa. Ulje koje pršti iz ležajeva na radilici obično podmazuje osovinice klipa i klizne površine cilindara. Suvišno ulje koje se nađe na zidovima cilindara uklanjaju klipni prstenovi za ulje (strugači) i vraćaju ga u korito za ulje. Glavni vod za ulje takođe se račva u kanale koji dovode ulje do ležajeva bregaste osovine, ležajeva klackalica u glavi motora, pogonskog lanca bregaste osovine i drugih pokretnih dijelova. Ulje sa svih ovih dijelova se potom vraća nazad u korito za ulje.



Slika 3.35. Sistem za podmazivanje automobila

Dijelovi sistema za podmazivanje su:

1. Pumpe za ulje - obezbjeđuje ispravan pritisak ulja u sistemu za podmazivanje.

Za distribuciju ulja u sistemima podmazivanja pod pritiskom najčešće se koriste zupčaste i rotorske pumpe s unutrašnjim ozubljenjem. Ove pumpe obično se pokreću putem bregaste osovine ili radilice. Kada je motor hladan, ulje je viskozno, pa je potreban visok pritisak da bi se potisnulo u uske kanale za ulje. Kako bi se spriječilo oštećenje pumpe pri prekomjernom pritisku, aktivira se prelivni ventil koji omogućava da dio ulja bude vraćen u korito.

Motori s mokrim koritom, gdje se ulje pohranjuje u donjem kućištu koje funkcioniše kao rezervoar, obično koriste jednu potisnu pumpu koja crpi ulje iz korita i šalje ga u sistem podmazivanja. S druge strane, kod motora s suvim karterom, gdje se ulje skladišti u posebnom rezervoaru, koristi se više crpnih pumpi koje uzimaju ulje sa dna korita motora, koje je prethodno slivljeno s površina koje su podmazivane. Ove pumpe prebacuju ulje u rezervoar za skladištenje. Suvi karter je čest kod velikih motora, ali se koristi i u manjim specijalizovanim motorima, poput onih u avionima, trkačkim vozilima, radnim mašinama i sl. U takvim slučajevima, potisna pumpa prebacuje ulje iz rezervoara u sistem podmazivanja motora.

2. Prečistač ulja - odvaja prljavštinu koje cirkuliše u sistemu za podmazivanje.

Na svom putu u pumpu motorno ulje prolazi kroz sito koje zadržava najgrublju nečistoću. Pored toga na kućište radilice je pričvršćen i prečištac ulja, koji je priključen u kruženje ulja da bi zadržao najsitniju nečistoću. Suviše veliki pritisak ulja reguliše ventil sigurnosti koji se nalazi na prečistaču. Ovaj ventil se otvara i omogućava kruženje ulja kad se prelivni ventil zapuši.

Kod motora se koriste dva tipa prečistača: prečistač ulja punog protoka i prečistač ulja djelimičnog protoka. Kod prečistača ulja punog protoka sve ulje prolazi kroz prečistač tako da se iz njega otklanjaju sve čestice koje bi mogle da ugroze normalno funkcionisanje ležaja. Ovaj tip prečišćavanja se i najčešće koristi kod svih motora putničkih i teretnih vozila.

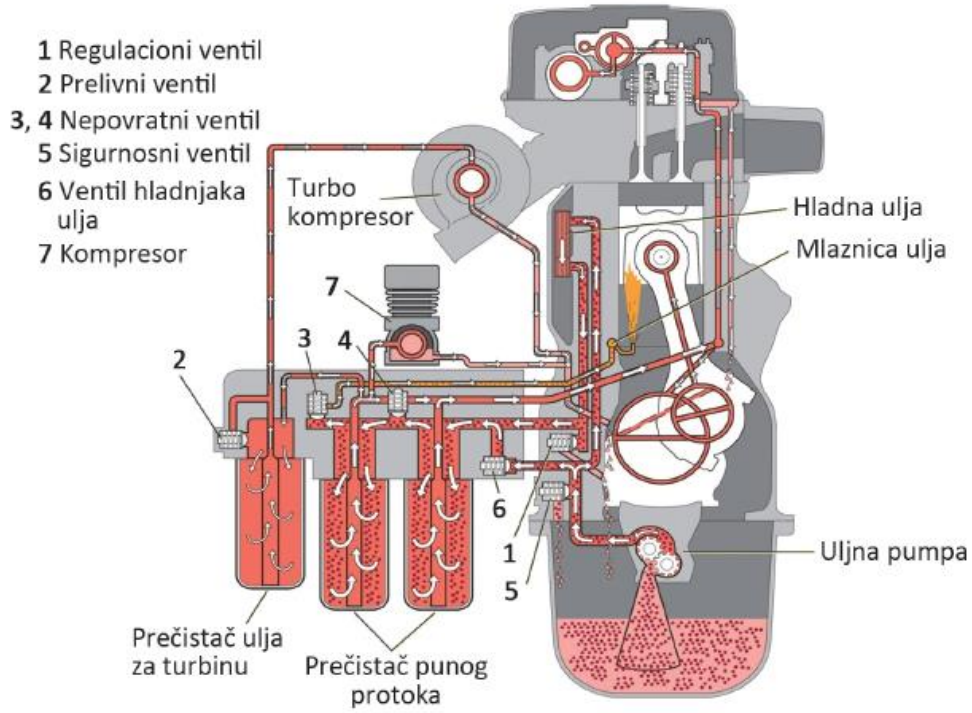
3. Hladnjak za ulje – služi za hlađenje ulja koje je preuzelo dio toplote od motora.

Obično se nalazi na prednjem dijelu vozila kako bi efikasnije smanjio temperature ulja uz pomoć spoljnjeg vazduha. Rebrastog je tipa da bi povećao površinu koja se hladi. Hladnjak ulja se najčešće smješta na ulazu ulja u motor, pri čemu on može biti izveden na više načina:

- Hladnjak ulje - vazduh, kada se ulje hladi pomoću okolnog vazduha koji struji pod dejstvom kretanja vozila ili ventilatora;
- Hladnjak ulje - voda, kada se ulje hladi pomoću vode iz rashladnog sistema motora ili iz okoline gdje motor radi.

4. Korito za ulje (karter) - kontejner iz kojeg sistem za podmazivanje uvlači svježe ulje. Korito za ulje je sastavni dio nepokretnog dijela motora gdje se smješta ulje.
5. Senzor pritiska - to je veoma važan element koji prati pritisak ulja u sistemu.
6. Turbina - turbo punjač se podmazuje I hladi istim uljem kao i čitav motor.

Pored navedenih dijelova u sistem podmazivanja spadaju cijevi i crijeva koja spajaju hladnjak ulja sa koritom, kanalice kroz glavu i blok motrora, kanalice kroz ležajeve klipa, klipnjače, koljenastog vratila, bregastog vratila itd.



Slika 3.36. Sistem za podmazivanje (Milašinović i Knežević, 2010)

Cilindri motora obično se podmazuju prskanjem ulja, osim u slučajevima sporohodnih brodskih motora, gdje se ulje dovodi pod pritiskom. Prskanje ulja ostvaruje se uglavnom pomoću ulja koje izlazi iz ležaja koljenastog vratila. Pod uticajem centrifugalne sile, ulje se raspršuje po cijelom kućištu, podmazujući sve klizne površine unutar motora.

Kvalitet ulja za podmazivanje je ključan za dugotrajan rad motora. U modernim motorima koristi se mineralno, polusintetičko ili sintetičko ulje. Mineralno ulje, koje je destilat sirove nafte, obično služi kao motorno ulje, ali pri temperaturama od -35°C postaje potpuno čvrsto, dok pri visokim temperaturama do kojih se klipovi motora mogu zagrijati postaje tečno, a pri 230°C može doći do zapaljenja. Takvo ulje ne bi bilo pogodno za motor, jer bi uzrokovalo brzo oštećenje i smanjenje performansi zbog sagorelih ostataka. Kako bi se ovo izbjeglo, ulja se obogaćuju aditivima koji poboljšavaju njihova svojstva.

U slučaju nedovoljnog snabdijevanja uljem, dolazi do oštećenja pokretnih dijelova motora. S obzirom na različite zadatke, radne uvjete i vrste trenja u motoru, ulje u sistemu podmazivanja mora posjedovati specifične karakteristike, uključujući: viskozitet, indeks viskoziteta, oksidacionu i hemijsku stabilnost, detergentna i dispergantna svojstva, mazivna svojstva, neutralizacijska svojstva, tačku paljenja, tačku stišnjavanja i sadržaj pepela. Zbog visokih temperatura u motoru i prisustva ostataka sagorijevanja, motorno ulje s vremenom gubi svoja svojstva i treba ga redovno mijenjati, prema uputstvima proizvođača motora.

3.7. Sistem za hlađenje

Tokom rada motora, sagorevanje radne smjese generiše toplotu koja vrši pritisak na čelo klipa, čime se toplota pretvara u mehanički rad. Djelimično se prenosi na zidove cilindra, cilindarsku glavu, ventile, klipove i druge komponente. Iako je hlađenje motora neizbežan proces i predstavlja gubitak, od ključne je važnosti. Bez adekvatnog hlađenja, dijelovi motora bi se pregrijali, što bi dovelo do smanjenja mehaničkih svojstava i opadanja snage motora. To bi uzrokovalo lošije punjenje cilindara i nižu kompresiju. Maksimalne temperature u prostoru sagorijevanja mogu doseći od 2000 do 2500 K, dok su srednje temperature približno 1000 K, što je daleko iznad dozvoljenih granica. Da bi motor radio efikasno, potrebno je da se toplota sa vrućih dijelova odvodi, a hlađenje je proces u kojem se gubi oko 30% energije. Hlađenje također igra ključnu ulogu u poboljšanju punjenja cilindara radnom smjesom kod benzinskih motora, odnosno vazduhom kod dizel motora. Sistem za hlađenje mora ukloniti višak toplote, sprečiti prekomjerno zagrevanje dijelova i omogućiti stabilan rad motora. Dok su neki motori u prošlosti koristili vazdušno hlađenje, danas se gotovo isključivo koriste sistemi za hlađenje rashladnom tečnošću, kao što su voda ili antifriz.

Prekomjerno povećanje temperature može izazvati nekoliko negativnih efekata na rad motora:

- Može dovesti do promjene mehaničkih osobina materijala od kojih je motor napravljen, čime se smanjuje njegova dugovječnost i efikasnost.
- Kod OTO motora, gdje se paljenje smjese postiže varnicom koju stvara svjećica, prekomjerno zagrijavanje može izazvati samopaljenje dijelova smjese. To dovodi do detonativnog (eksplozivnog) sagorijevanja, što smanjuje ekonomičnost motora (povećava potrošnju goriva) i stvara veća mehanička opterećenja.
- Pri visokim temperaturama, ulje gubi svoja svojstva, što može ugroziti podmazivanje klipova, klipnih prstenova i cilindara, a može izazvati i zaglavljivanje klipnih prstenova.
- Prekomjerno zagrijavanje može dovesti do pregrijavanja usisnih kanala, što smanjuje koeficijent punjenja i negativno utiče na performanse motora.
- Takođe, visoke temperature mogu uzrokovati pregrijavanje komore sagorijevanja, čime se povećava rizik od detonacije u benzinskim motorima.

Ako su temperature dijelova preniske dolazi do:

- Povećanja mehaničkih gubitaka zbog većeg viskoziteta maziva što dovodi do pada snage i povećanja potrošnje;
- Povećanja toplotnih gubitaka (povećano odavanje toplote hladnim zidovima);
- Težeg prodiranja ulja u zazore zbog njegove povećane viskoznosti;
- Kondenzacije goriva (kod benzinskih motora) i vodene pare, stvaranje kiselih taloga (prije svega sumpornih) – povećana korozija dijelova.

Sve ovo upućuje na zaključak da je neophodno održavati odgovarajući temperaturni nivo dijelova motora regulacijom intenziteta hlađenja. Hlađenje može da bude: vazduhom i rashladnom tečnošću. No osim hlađenja, rashladni system ima još dvije važne uloge: da brine

za održavanje ispravne radne temperature motora i da omogućava grijanje putničke kabine. Zbog svega navedenog motor se mora hladiti. Hlađenje motora može biti tečnošću i vazduhom. Osnovna podjela sistema za hlađenje sa tečnošću uključuje protočne sisteme i cirkulacione sisteme. Cirkulacioni sistemi dalje se dijele na sisteme sa prirodnom cirkulacijom, poznate kao termosifonski sistemi, i sisteme sa prinudnom cirkulacijom, koji mogu biti otvoreni ili zatvoreni.

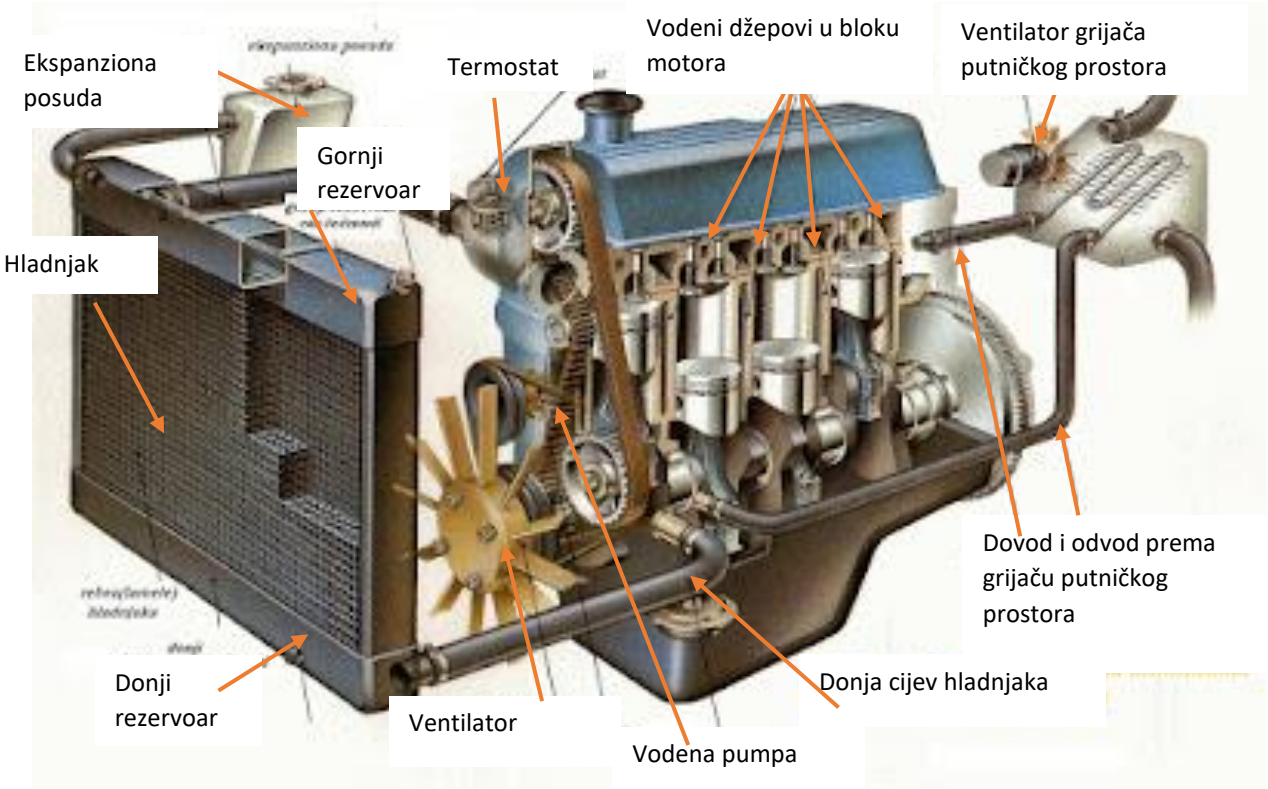
Protočni sistemi za hlađenje koriste se u aplikacijama motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) u kojima postoji neograničen izvor tečnosti, što je slučaj sa brodskim motorima. S druge strane, cirkulacioni sistemi koriste ograničenu količinu rashladne tečnosti, koja prirodnim putem (termosifonskim principom) ili prinudno cirkuliše kroz sistem, čime se ista tečnost koristi više puta za hlađenje motora.

Hlađenje vazduhom je jednostavnije sa konstruktivnog aspekta u poređenju sa hlađenjem tečnošću. Vazduh se usmjerava oko vanjskih dijelova motora, preuzimajući višak toplote. Zbog manje specifične toplote vazduha u odnosu na vodu, za efikasno hlađenje, glava motora i cilindri se obično prave od aluminijumskih legura, dok se površine dodatno povećavaju rebrima za hlađenje. Crne površine rebra povećavaju kapacitet prenosa toplote. Intenzitet hlađenja vazduhom zavisi od veličine rashladnih površina, materijala, brzine strujanja vazduha, temperature površina i temperature vazduha.

Glavni dijelovi sistema za hlađenje motora uključuju: ekspanzionu posudu, hladnjak, termostat, pumpu za rashladnu tečnost, ventilator, cjevovodni sistem sa kanalima u bloku i glavi motora, kao i podsistem za grijanje i ventilaciju kabine (Slika 3.37).

Prije startovanja motora, rashladna tečnost se nalazi unutar sistema u predviđenim granicama. Termostat je zatvoren, što sprečava cirkulaciju tečnosti, a temperatura tečnosti je približno jednaka vanjskim uslovima. Pumpa za rashladnu tečnost je u mirovanju, kao i ventilator.

Kada motor počne da radi, rotacija koljenastog vratila pokreće ventilator, koji usmjerava vazduh prema hladnjaku. Pumpa je povezana sa radilicom pomoću zupčastog kaiša, a dok je termostat zatvoren, pumpa radi u praznom hodu. Prazni hod pumpe može biti riješen različitim konstruktivnim rješenjima, u zavisnosti od proizvođača. Kako se temperatura motora povećava, termostat se otvara i tečnost počinje da cirkuliše kroz sistem. Zagrijana tečnost se šalje u hladnjak, gdje prolazi kroz lamelasti dio, hladi se pomoću vanjskog vazduha i zatim se vraća u motor putem cjevovoda. Dio zagrijane tečnosti može se iskoristiti za grijanje kabine, a različiti proizvođači rješavaju ovu funkcionalnost na različite načine.

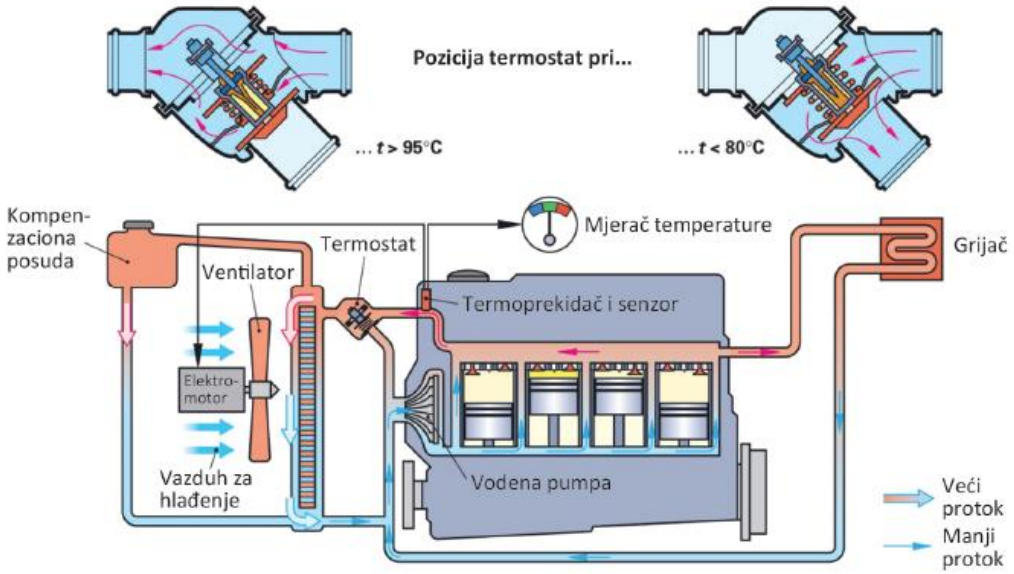


Slika 3.37. Sistem za hlađenje motora rashladnom tekućinom

Tečnost za hlađenje motora ne smije biti obična voda jer može uzrokovati niz problema. Voda doprinosi stvaranju kamenca, što usporava protok tečnosti kroz sistem, a na temperaturama ispod 0 °C može se zaleditи, što dovodi do pucanja bloka i glave motora. Pri visokim temperaturama, obična voda brzo isparava u obliku pare, dok njena korozivna svojstva negativno utiču na metalne dijelove sistema. Zbog ovih razloga, za hlađenje motora koristi se antifriz. Njegova osnovna funkcija je smanjenje tačke smrzavanja tečnosti. Pored toga, antifriz povećava tačku ključanja, ima antikorozivna svojstva, sprječava pjenušanje i taloženje, sprečava stvaranje kamenca i posjeduje podmazujuća svojstva. Antifriz se nikada ne koristi u čistom obliku, već se miješa sa destilovanom vodom u odgovarajućem omjeru, kako bi sistem za hlađenje funkcionisao optimalno.

Sistemi sa prinudnom cirkulacijom – zatvoreni

Moderni motori uglavnom koriste zatvorene cirkulacione sisteme za hlađenje, kako bi se eliminisala pojava parnih čepova i time spriječila kavitaciona oštećenja. Ova oštećenja najčešće pogađaju lopatice rotora pumpe za tečnost i vanjske površine cilindarske košuljice ili bloka motora koje su u kontaktu s rashladnom tečnošću. Zatvoreni sistemi funkcionišu pod određenim nadpritiskom, obično do 3 bara (Slika 3.38), što osigurava efikasniji rad i sprječava stvaranje mjehurića pare unutar sistema. Ovakva konstrukcija omogućava pouzdano hlađenje i smanjuje rizik od oštećenja komponenti sistema.



Slika 3.38. Šema zatvorenog Sistema hlađenja rashladnom tekućinom (Milašinović i Knežević, 2010)

Hladnjak

Hladnjak služi za hlađenje zagrijane vode koja izlazi iz motora, kako bi se rashlađena vratila nazad u motor. Sastoji se od komore za vodu iz motora, otvora za sipanje, prelivne cijevi, saća, donje komore za rashlađenu vodu i zavjese za regulisanje hlađenja. Cijevi kroz koje prolazi rashladna tečnost izrađene su od bakra ili mesinga zbog otpornosti na koroziju. Hladnjak je povezan s motorom elastičnim cijevima, a s karoserijom preko gumenih nosača.

Ekspanziona posuda

Mjesto priključivanja ekspanzione posude u sistem za hlađenje motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) značajno utiče na pojavu kavitacije na pumpi za tečnost i opterećenje dijelova sistema. U ekspanzionoj posudi se odvaja gas iz rashladne tečnosti. Na posudu se priključuju vodovi iz cilindarske glave, ulaza tečnosti u hladnjak i eventualno odzračni vod iz sistema za grijanje putničkog prostora. Prigušnice se obično postavljaju na priključnim vodovima kako bi protok kroz posudu bio relativno mali.



Slika 3.39. Hladnjak (lijevo), termostat (desno)

Pumpa tečnosti za hlađenje

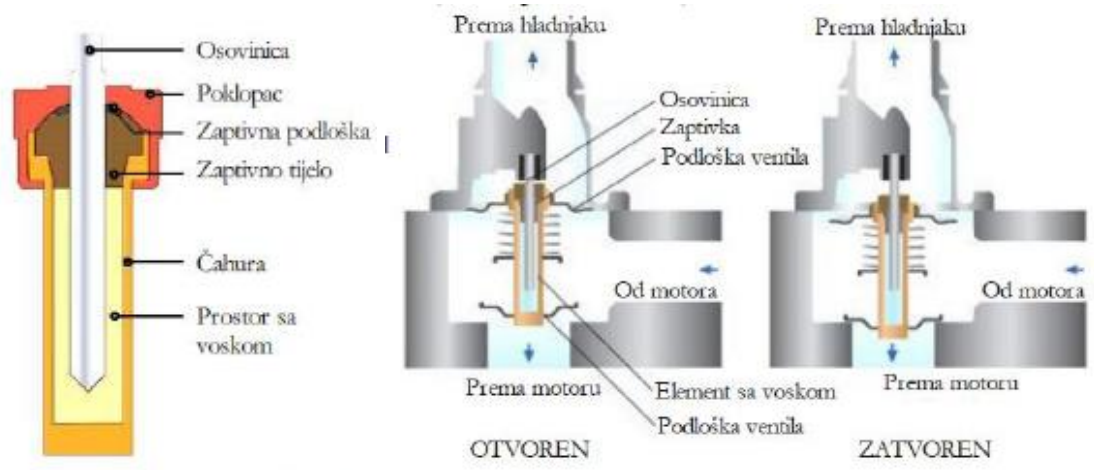
Kod savremenih motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) koriste se dvije glavne grupe pumpi: mehaničke i električne pumpe. Mehaničke pumpe se obično pokreću putem remena i remenice motora, dok se rješenje s pogonom putem zupčastog remena rijetko koristi. S druge strane, električne pumpe su nezavisne od motora, što omogućava kontrolu broja obrtaja pumpe i protoka rashladne tečnosti prema potrebi. U konstruktivnom smislu, najčešće se koriste jednostepene radijalne pumpe za hlađenje tečnosti.



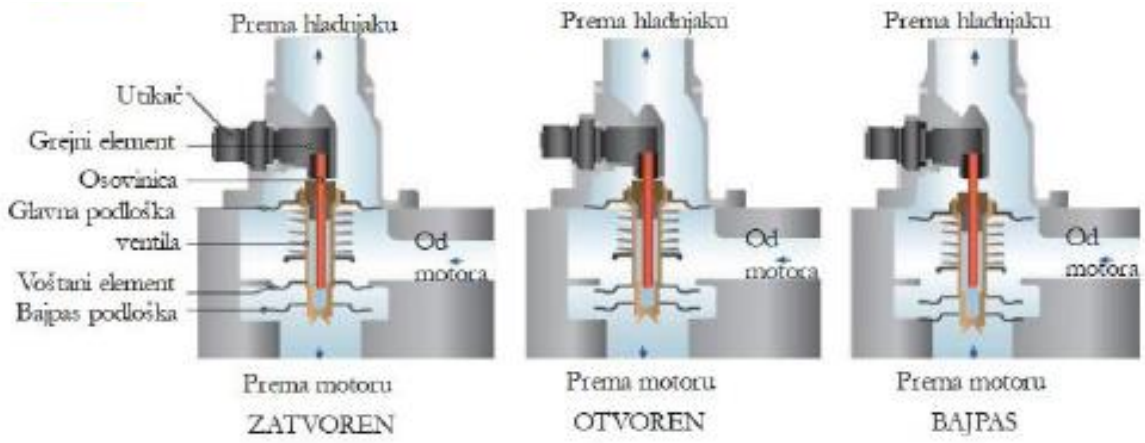
Slika 3.40. Pumpa tečnosti za hlađenje

Termostatski ventil

Termostatski ventil se postavlja u cjevovod na izlazu rashladne tečnosti iz motora, a njegov osnovni zadatak je preusmjeravanje tečnosti, u zavisnosti od njene temperature. Kada je tečnost hladnija, ventil je usmjerava nazad prema motoru (sporedni tok), a kada je dovoljno zagrijana, preusmjerava je prema hladnjaku (glavni tok). Termostatski ventil funkcioniše na osnovu temperature tečnosti. Prema konstrukciji, postoje ventili s voskom, s voskom i električnim grijanjem, te potpuno električni ventili.



Slika 3.41. Konvencionalni termostatski ventil



Slika 3.42. Električno grijani termostatski ventil

Dilatacioni element termostata može biti s tečnim punjenjem, pri čemu tečnost isparava na regulacionoj temperaturi, šireći dilatacioni element u obliku mijeha. Danas se češće koristi termostat s čvrstim punjenjem, obično voskom, koji se širi pri topljenju na regulacionoj temperaturi, pokrećući ventile. Ovaj tip termostata je pouzdaniji, precizniji i manjih dimenzija. Najjednostavnije rješenje za pogon ventilatora je mehanički pogon preko kaišnog prenosnika, ali se danas rijetko koristi zbog neefikasnosti – ventilator radi čak i kada nije potreban, trošeći snagu motora. Kod savremenih vozila s motorima manje snage koristi se električni pogon ventilatora, koji se uključuje po potrebi pomoću termo-prekidača. Regulacija je obično tipa uključen – isključen za pogonski elektromotor.

3.8. Proračun parametara motora SUS

Motor je uređaj koji pretvara različite oblike energije u mehaničku energiju. Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) spadaju u grupu toplotnih motora, jer se kod njih toplotna energija, oslobođena sagorijevanjem goriva, pretvara prvo u potencijalnu energiju radnog fluida, a zatim kroz ekspanziju fluida u korisnu mehaničku energiju. Pretvaranje toplote u rad ili rada u toplotu obično se ostvaruje kroz termodinamički proces uz posredstvo radnog fluida. Kod motora SUS radni fluid je smjesa gasova nastala sagorijevanjem unutar cilindra motora. Procesi u SUS motorima su veoma složeni, pa je teško precizno matematički obuhvatiti uticaj pojedinih fizičkih i hemijskih procesa na radni ciklus motora (Popović i Miljić, 2018).

Ovi uticaji se uglavnom mogu analizirati dijeljenjem radnog ciklusa na pojedine faze i analizom svake faze posebno. Uvođenje uporednih ciklusa se pokazalo kao koristan pristup. Pomoću tih ciklusa, na koje se može primijeniti egzaktan proračun, mogu se izračunati osnovna svojstva radnog ciklusa, a rezultati su često veoma slični stvarnom radnom ciklusu motora. Ovakvim pristupom moguće je proračunom odrediti uticaj promjena pojedinih parametara na osnovne veličine radnog ciklusa motora. Na primjer, može se izračunati uticaj stepena sabijanja, koeficijenta viška zraka i maksimalnog pritiska sagorijevanja na radni ciklus, a dobijeni rezultati mogu se porediti s eksperimentalnim podacima. Stoga je važno da pretpostavke uporednih ciklusa budu što bliže stvarnom procesu u motoru. U zavisnosti od pretpostavki za proračun, uporedni ciklusi motora mogu se podijeliti na: termodinamičke (idealne), poluteorijske i stvarne cikluse.

3.8.1. Teorijski (idealni) i realni (stvarni) ciklusi motora SUS

Radni proces u motoru odvija se po ciklusu, odnosno zatvorenom kružnom procesu koji se periodično ponavlja tokom vremena. Tokom jednog ciklusa razvija se rad na osnovu oslobođene toplote sagorijevanjem goriva. Veličina razvijenog rada i efikasnost cjelokupne energetske transformacije zavise od načina i kvaliteta odvijanja kružnog procesa tokom radnog ciklusa motora. Stvarni radni ciklus, koji se odvija u motoru, je veoma kompleksan i još uvijek nije potpuno poznat i usavršen. Zbog toga se, radi lakšeg razmatranja i upoređenja, pri analizi uvode određena uprošćenja. Radni ciklusi motora mogu se proučavati kao: idealni termodinamički ciklusi, teorijski termodinamički ciklusi i realni radni ciklusi, kako je ranije navedeno.

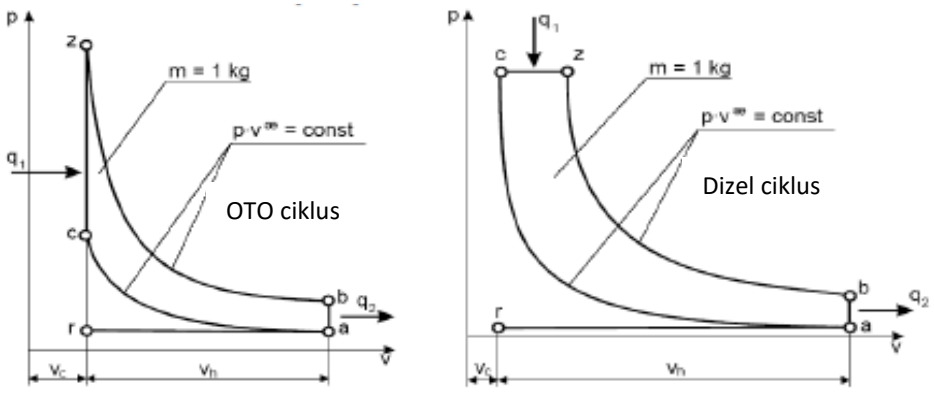
Teorijski kružni ciklusi

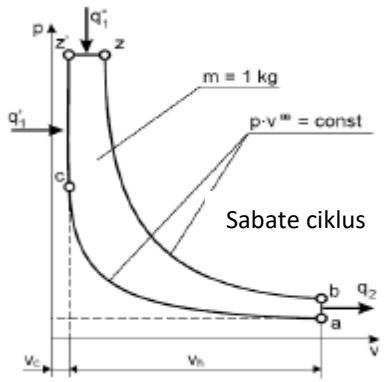
Osnovne pretpostavke koje se primjenjuju pri razmatranju teorijskih termodinamičkih ciklusa su sljedeće:

- Radna materija je gas čiji sastav ostaje nepromijenjen tokom cijelog ciklusa.
- Radna materija se ponaša kao idealan gas sa konstantnim svojstvima tokom ciklusa.
- Specifične toplote radnog gasa ostaju nepromijenjene, bez obzira na temperaturne promjene.
- Proces sagorijevanja je zamijenjen dovođenjem toplote, dok je izmjena radne materije predstavljena odvođenjem toplote.
- Izmjena radne materije odvija se bez energetskih gubitaka.
- Procesi sabijanja i širenja radne materije su adijabatski, što znači da ne dolazi do razmjene toplote sa okolinom.

Osnovni kružni termodinamički ciklusi koji su značajni za klipne motore sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) uključuju:

- Oto ciklus – ciklus u kojem se toplota dovodi pri konstantnoj zapremini (V = const).
- Dizel ciklus – ciklus u kojem se toplota dovodi pri konstantnom pritisku (p = const).
- Sabate ciklus – kombinovani ciklus gdje se toplota dijelom dovodi pri konstantnoj zapremini (V = const), a dijelom pri konstantnom pritisku (p = const).

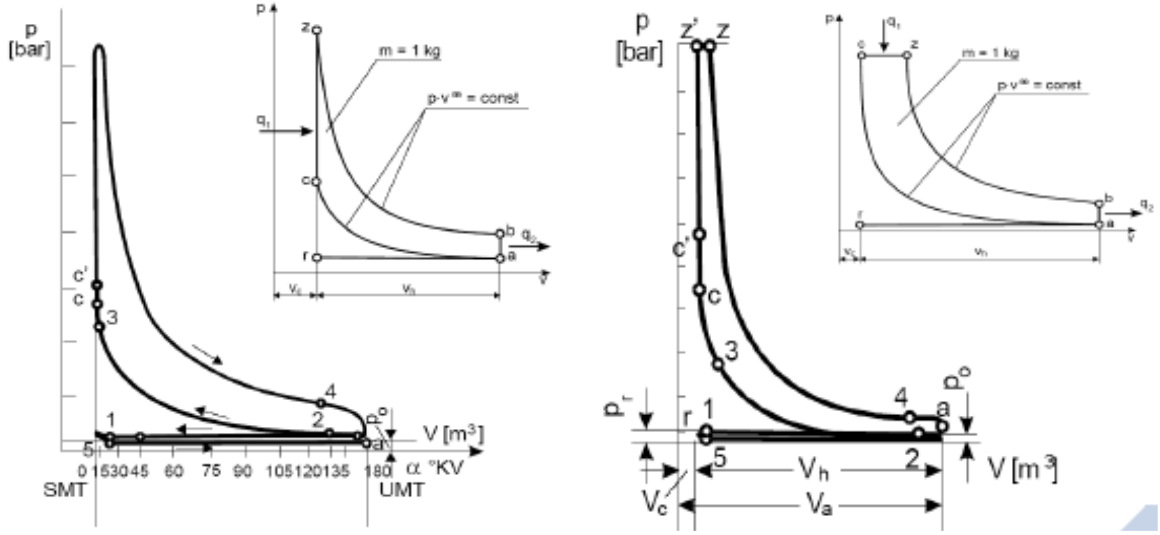




Slika 3.43. Osnovni kružni termodinamički ciklusi vezani za klipne motore SUS

Realni kružni ciklusi

Realni radni ciklus dosta odstupa od teorijskog ciklusa i kod njega nisu tako jasno odvojene pojedine faze i fizičko hemijski procesi jedan od drugog.



OTO ciklus Dizel ciklus

Slika 3.44. Realni kružni termodinamički ciklusi vezani za klipne motore SUS

Osnovne razlike između realnih i teorijskih termodinamičkih ciklusa proizlaze iz sljedećih faktora:

- Radni fluid u stvarnim uslovima nije idealan gas, već predstavlja smjesu goriva, vazduha i produkata sagorijevanja.
- Procesi sabijanja i širenja nisu u potpunosti adijabatski, jer dolazi do razmjene toplote sa okolinom.
- Sagorijevanje traje određeno vrijeme i proteže se i na takt širenja, pri čemu dolazi do prijenosa toplote radnog fluida na zidove cilindra.
- Dovođenje toplote je kontinuirani proces sagorijevanja, koji uključuje složene fizičko-hemijske reakcije praćene gubicima i nesavršenostima.

- Tokom punjenja i pražnjenja motora dolazi do strujnih gubitaka, koji se ne mogu u potpunosti eliminisati.
- Gubici toplote u okolinu, prvenstveno putem sistema hlađenja, značajni su tokom cijelog ciklusa, a posebno tokom sagorijevanja.
- Dodatni energetski gubici, poput nezaptivenosti radnog prostora, gubitaka toplote zračenjem, nepotpunog sagorijevanja i nesavršenosti u regulaciji, dodatno smanjuju efikasnost realnih ciklusa.

3.8.2. Radni parametri motora SUS

Radni proces motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) u cjelini karakterišu radni parametri motora. Oni kvantifikovano (brojno) izražavaju kvalitet radnog procesa motora u pogledu radnog učinka, efikasnosti, ekonomičnosti i sličnih aspekata.

Radni parametri motora omogućavaju: poređenje sa konkurentnim agregatima, procjenu mogućnosti primjene u pojedinim oblastima i mogu se svrstati u tri grupe:

- Indicirani (indikatorski) parametri – karakterišu ono što motor razvija u radnom prostoru (cilindru),
- Efektivni parametri – karakterišu ono što motor daje na izlaznom vratilu (što je na raspolaganju korisniku),
- Kompleksni radni parametri – karakterišu forsiranost motora ili neku drugu osobenost.

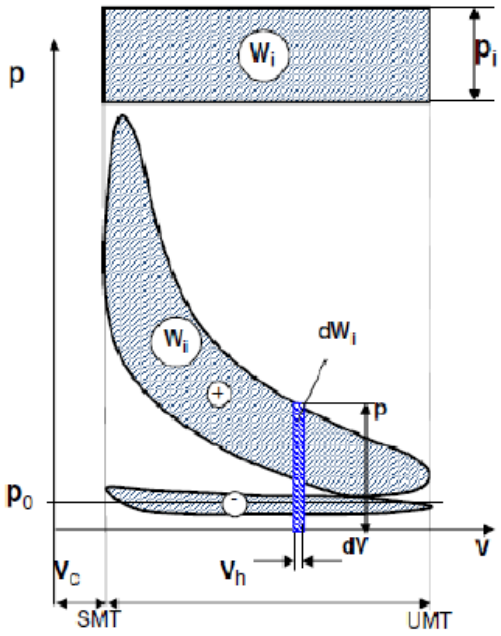
3.8.2.1. Indicirani (indikatorski) parametri motora

Indicirani (indikatorski) parametri definišu učinak i ekonomičnost motora u njegovom radnom prostoru, odnosno unutar cilindra motora. Oni predstavljaju parametre koji direktno pokazuju rezultate stvarnog radnog ciklusa motora. Osnovni indicirani parametri motora su: srednji indicirani pritisak, indicirana snaga motora, specifična indicirana potrošnja goriva, indikatorski stepen korisnosti i stepen dobrote radnog ciklusa.

Srednji indicirani pritisak

Srednji indicirani pritisak predstavlja mjerilo razvijenog specifičnog rada tokom radnog procesa i pokazuje koliko je rad razvijen unutar cilindra motora po jedinici radne zapremine. On na taj način izražava učinak motora, odnosno njegovu sposobnost da iz jedinice radne zapremine razvije određeni rad tokom radnog ciklusa. Srednji indicirani pritisak je fiktivni pritisak koji bi, djelujući na čelo klipa tokom njegovog hoda od spoljašnje ka unutrašnjoj mrtvoj tački, ostvario isti rad kao stvarni promjenljivi pritisak u cilindru. Grafički se u p-V dijagramu prikazuje kao visina pravougaonika, čija je osnova jednaka radnoj zapremini cilindra, dok je površina tog pravougaonika jednaka površini omeđenoj krivuljama radnog procesa, označena sa Wi (Slika 3.45).

$$p_i = \frac{W_i}{V_h}\left[\frac{J}{m^3}\right] \qquad W_i = \oint p dV \; [J]$$



Slika 3.45. Grafička interpretacija srednjeg indiciranog pritiska

Srednji indicirani pritisak klasičnih klipnih motora je povoljniji za OTO motore jer oni rade sa približno optimalnom smješom goriva i vazduha. Dizel motori rade sa viškom vazduha koji se nepotrebno grije i onemogućava da se taj dio toplotne energije prevede u mehanički rad. Ovaj nedostatak dizel motora se eliminiše nadpunjenjem (motori sa kompresorom). Time je omogućeno da se značajno poveća specifični rad ciklusa. (Ćuprić, 2010; Popović i Miljić, 2018)

Indicirana snaga motora

Indicirana snaga motora (*Pi*) je snaga koju motor razvija u svojim cilindrima. Po definiciji: snaga je rad razvijen u jedinici vremena, pa je indicirana snaga jednaka indiciranom radu (*Wi*) u jedinici vremena (τ). Pošto se tokom jednog ciklusa razvija rad (Wi), pri čemi u jedinici vremena imamo ciklus (2n/τ), gdje je τ – taktnost motra, a n – broj obrtaja koljenastog vratila, z-broj cilindara motora, *Vhu* - ukupna radna zapremina mtora, *Vh* - radna zapremina jednog cilindra.

$$P_i = W_i \frac{2n}{\tau} = p_i V_h \frac{2n}{\tau} \quad [W]; \quad p_i \left[\frac{N}{m^2}\right], \quad V_h[m^3]$$

$$P_i = z \cdot p_i V_h \frac{2n}{\tau} = p_i V_{hu} \frac{2n}{\tau} \quad [W]$$

$$P_i = \frac{p_i V_{hu} n}{300\tau} \quad [kW]$$

- p_i[bar]; V_{hu}[dm^3]; n[min^{-1}] i P_i[kW]

Specifična indicirana potrošnja goriva

Ekonomičnost radnog procesa određuje se na osnovu potrošnje goriva potrebne za razvijanje jedinice snage. Parametar koji definiše taj odnos naziva se specifična indicirana potrošnja goriva, i predstavlja odnos između potrošnje goriva u jedinici vremena i razvijene snage u

cilindru motora. Ovaj parametar je ključan za ocjenu efikasnosti motora, jer pokazuje koliko goriva je potrebno da se proizvede određena količina snage, što direktno utiče na ukupnu ekonomičnost motora u radu.

$$g_i = \frac{m_g}{P_i}\left[\frac{kg}{Ws}\right] \quad g_i = \frac{G_h}{P_i}\cdot 10^3\left[\frac{g}{kWh}\right]$$

- G_h[kg/h], P_i[kW] i g_i[g/kWh]

Specifična indicirana potrošnja goriva za benzinske motore iznosi između 220 i 270 g/kWh, dok je za dizel motore niža, u rasponu od 160 do 240 g/kWh, što ukazuje na veću efikasnost dizel motora u pogledu potrošnje goriva.

Indikatorski stepen korisnosti

Indikatorski stepen korisnosti predstavlja mjerilo kvaliteta radnog procesa u cilindru motora, posebno u pogledu njegove ekonomičnosti i iskorišćenja toplotne energije goriva. Definiše se kao odnos dobijene energije, u obliku razvijenog mehaničkog rada tokom radnog procesa, prema uloženoj energiji koja se oslobađa sagorijevanjem goriva u cilindru motora. Ovaj parametar je ključan za procjenu efikasnosti motora u pretvaranju toplotne energije u mehanički rad.

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{gc}} \quad [-] \quad Q_{gc} = \frac{m_g H_d}{z}\cdot\frac{2n}{\tau} \quad \left[\frac{J}{cikl.}\right] \quad W_i = \frac{P_i}{\frac{2n}{z\tau}}$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{\dot{m}_g H_d} = \frac{1}{g_i H_d}$$

ηi - indikatorski stepen korisnosti, Wi - dobijeni mehanički rad tokom radnog procesa u cilindru motora, Qgc - energija oslobođena sagorijevanjem goriva u cilindru motora, mg - maseni protok goriva, Hd - donja toplotna moć goriva, z - broj ciklusa u kojem se oslobađa energija, n - broj obrtaja motora, τ - broj taktova motora, Pi - indikatorska snaga motora, gi - specifična indikatorska potrošnja goriva.

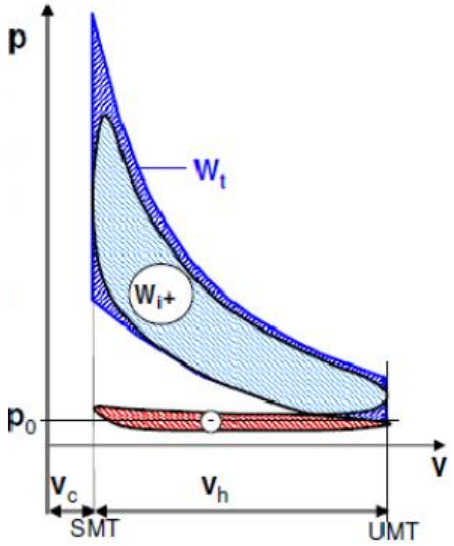
Indikatorski stepen korisnosti (η_i) za benzinske i dizel motore imaju različite vrijednosti. Vrijednosti za benzinske motore se kreću u rasponu od 0,3 do 0,37, dok za dizel motore te vrijednosti variraju između 0,36 i 0,53. Ovi podaci pokazuju da dizel motori imaju viši indikatorski stepen korisnosti u poređenju sa benzinskim motorima, što znači da su dizel motori efikasniji u pretvaranju toplotne energije goriva u mehanički rad. Razlog za ovu razliku leži u višem stepenu sabijanja kod dizel motora i efikasnijem sagorijevanju goriva.

Stepen dobrote radnog ciklusa

Maksimalni rad i stepen korisnosti koji se može postići kada motor radi po određenom ciklusu definiše teorijski ciklus motora. Što je stvarni radni ciklus bliži teorijskom ciklusu, to je njegov kvalitet bolji, što znači da će motor razviti veći rad i imati viši stepen korisnosti. Parametar koji određuje koliko se stvarni ciklus približava teorijskom naziva se stepen dobrote ciklusa. Ovaj

parametar je ključan za procjenu efikasnosti stvarnog rada motora u odnosu na idealne uslove rada.

$$\eta_d = \frac{W_i}{W_t} \qquad \eta_i = \eta_t \cdot \eta_d \qquad \eta_d = \frac{\eta_i}{\eta_t}$$



Slika 3.46. Grafička interpretacija stepena dobrote radnog ciklusa

3.8.2.2. Efektivni parametri motora

Efektivni parametri motora su pokazatelji učinka i efikasnosti motora u cjelini, posebno u odnosu na snagu koju motor prenosi na radno vratilo ili zamajac. Ovi parametri pokazuju ono što motor stvarno isporučuje mašini koju pokreće i čiji otpor savlađuje. Razlika između indiciranih i efektivnih parametara nastaje zato što se dio indicirane snage, razvijene unutar cilindara motora, troši na savladavanje unutrašnjih mehaničkih otpora motora. Kao rezultat toga, na izlazu motora, potrošaču ostaje manji dio snage u obliku efektivne snage. Osnovni efektivni parametri klipnih motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (SUS) uključuju: srednji efektivni pritisak, efektivnu snagu motora, specifičnu efektivnu potrošnju goriva, mehanički stepen korisnosti i efektivni stepen korisnosti.

Mehanički otpori u motoru

Dio razvijene snage motora troši se unutar motora na savladavanje otpora u njemu. Svi otpori unutar motora mogu se svrstati u nekoliko grupa prema snazi koja se na njih troši:

- P_{tr} - Snaga koja se troši na savlađivanje otpora trenja na pokretnim radnim sklopovima motora: P_{tr} ~ (0,6-0,8)Pm; 60-80% otpada na trenje klipa i klipnih prstenova u cilindru, a ostatak na ostale klizne površine,
- P_{pu} - Snaga koja se troši za pogon pomoćnih uređaja (pumpa za vodu, ulje, gorivo, ventilator, generator...): P_{pu} ~ (0,1-0,3)P_m
- P_{ae} - Snaga aerodinamičkih otpora kretanja dijelova motora: Pae~(0,02-0,03) Pm

$$P_m = P_{tr} + P_{pu} + P_{ae}$$

Efektivna snaga motora

Efektivna snaga motora je snaga koju motor razvija na svom izlaznom vratilu (ili zamajcu) i koja je dostupna za efektivno iskorišćavanje. Ona se dobija kao razlika između indicirane snage, koja je razvijena unutar cilindara, i mehaničkih gubitaka koji nastaju unutar motora zbog trenja, pogonskih uređaja i drugih otpora. Drugim riječima, efektivna snaga predstavlja dio indicirane snage koja preostaje nakon što se oduzmu svi unutrašnji gubici motora.

$$P_e = P_i - P_m$$

Odnos efektivne snage motora i njegove radne zapremine, naziva se ***litarska snaga motora***. Ona predstavlja mjerilo zapreminskog forsiranja motora i za motore putničkih vozila iznosi 30 – 50 kW/lit, dok za dizel teretna vozila iznosi 10 – 20 kW/lit.

$$P_{el} = \frac{P_e}{V_{hu}} = \frac{p_e \cdot n}{300\tau} \quad \left[\frac{kW}{l}\right]$$

Srednji efektivni pritisak

Srednji efektivni pritisak motora je fiktivni pritisak koji, kada bi djelovao na čelo klipa, dao bi isti efektivni rad na izlaznom vratilu (zamajcu) kao što ga daje stvrani promjenljivi pritisak gasova tokom ciklusa na klip. Srednji efektivni pritisak se koristi za upoređivanje razvijenog efetivnog rada iz jedinice radne zapremine različitih motora. Povoljnije su veće vrijednosti koje se kod klasičnih motora SUS kreću u granicama: 8-10 bara za Oto motore, a 6-8 bara za dizel motore. Kod motora sa nadpunjenjem granice su: 10-13 bara za Oto motore i 9-15 bara za dizel motore.

$$p_e = p_i - p_m$$

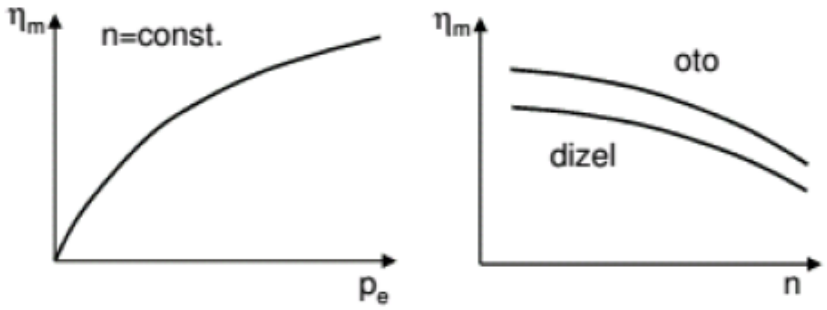
Za benzinske motore, srednji efektivni pritisak kod usisnih motora iznosi između 8 i 10 bara, dok kod natpunjenih motora varira između 10 i 16 bara. Kod dizel motora, usisni motori imaju pritisak između 6 i 8 bara, dok natpunjeni motori postižu srednji efektivni pritisak u rasponu od 10 do 18 bara.Ovi podaci pokazuju da natpunjeni motori, kako benzinski tako i dizel, imaju viši srednji efektivni pritisak u poređenju sa usisnim motorima, što rezultira većom snagom motora.

Mehanički stepen korisnosti

Stepen mehaničkog iskorišćenja motora definiše relativnu veličinu mehaničkih gubitaka u motoru, i predstavlja odnos energije koja se iskoristi na izlaznom vratilu prema energiji koja je stvorena tokom radnog procesa u cilindrima motora. Stepen mehaničkog iskorišćenja jednak je odnosu efektivne i indicirane snage. Okvirne vijednosti (nominalni režim) za klasične SUS motore je: η_m ~ 0,75 – 0,9.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{p_e}{p_i}$$

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i} = \frac{p_i - p_m}{p_i} = 1 - \frac{p_m}{p_i}$$



Slika 3.47. Mehanički stepen korisnosti

Efektivni stepen korisnosti

Efektivni stepen korisnosti predstavlja mjerilo ukupne ekonomičnosti motora. Definiše se kao odnos efektivno dobijene energije na izlazu iz motora prema ukupnoj energiji koja se dovodi sagorijevanjem goriva u cilindrima motora. Efektivni stepen korisnosti je povoljniji kod dizel motora, jer oni rade sa višim stepenom sabijanja i većim koeficijentom viška vazduha, što omogućava efikasnije sagorijevanje goriva i bolju iskoristivost energije.

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_g} = \frac{P_e}{\dot{m}_g H_d} \quad \eta_e = \frac{1}{g_e H_d} \qquad \eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$$

Za benzinske motore, efektivni stepen korisnosti iznosi između 0,25 i 0,3, dok je za dizel motore viši, u rasponu od 0.33 do 0.45.

Specifična efektivna potrošnja goriva

Ekonomičnost motora se najčešće ne ocjenjuje efektivnim stepenom korisnosti motora, već, tzv. specifičnom efektivnom potrošnjom goriva koja definiše potrebnu količinu goriva u jedinici vremena za razvijanje jedinice snage. Što je ovaj paramatar manji, to je ekonomičnost motora povoljnija.

Po definicije je, specifična efektivna potrošnja goriva jednaka odnosu potrošnje goriva i razvijene efektivne snage.

$$g_e = \frac{\dot{m}_g}{P_e}\left[\frac{kg}{Ws}\right] \quad g_e = \frac{G_h}{P_e} \cdot 10^3 \left[\frac{g}{kWh}\right]$$

Za benzinske motore, specifična efektivna potrošnja goriva varira između 250 i 300 g/kWh, dok je za dizel motore niža, u rasponu od 190 do 250 g/kWh. Dizel motori imaju manju specifičnu potrošnju goriva, što znači da su efikasniji u pretvaranju goriva u korisnu energiju u poređenju sa benzinskim motorima.

Veza između specifične efektivne i specifične indicirane potrošnje goriva definisana jesljedećom relacijom:

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m}$$

3.8.3. Toplotni bilans motora

Samo se jedan dio energije, dovedene motoru sagorijevanjem goriva, iskoristi za dobijanje efektivne snage. Ostali, i to znatno veći dio, odlazi na razne gubitke. Energetski bilans motora pokazuje raspodjelu energije dovedene motoru. Analiza energetskog bilansa omogućava: sagledavanje prirode i veličine različitih gubitaka, sagledavanje načina za smanjenje gubitaka i sagledavanje načina za eventualno iskorišćenje gubitaka.

Ako je ostvareno stacionarno stanje motora kao sistema (nema promjene energetskog nivoa sistema) može se postaviti jednačina održanja energije za motor kao otvoren sistem:

$$Q_g + Q_v = Q_e + Q_r + Q_{ng} + Q_w + Q_u + Q_o$$

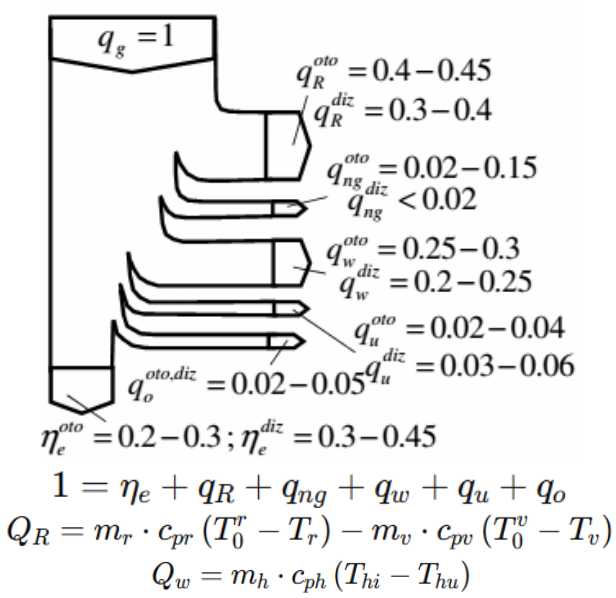
Ako se sa QR označi razlika energije koju iznose izduvni gasovi i energije koju unosi usisni vazduh QR = Qr - Qv dobija se energetski bilans motora u obliku:

$$Q_g = Q_e + Q_R + Q_{ng} + Q_w + Q_u + Q_o$$

Q_g - Energija koja se dovodi u motor gorivom (hemijska energija goriva)
Q_e= Pe - Energija koja se efektivno iskoristi i predaje potrošaču

$$Q_g = m_g \cdot H_d$$

gdje je: m_g – maseni protok goriva, H_d – donja toplotna moć goriva, QR – razlika energije koja se odvodi izduvnim gasovima (kao njihova totalna entalpija) i energije koja se dovodi usisnim vazduhom (entalpija usisnog vazduha), Qw – toplota koja se odvodi iz motora sredstvom za hlađenje, izražena kao razlika energije rashladnog sredstva motora na izlazu iz motora i na ulazu u motor, Qu – toplota koja se odvodi iz motora hlađenjem ulja za podmazivanje, određuje se na isti način kao i Qw, Qng – ekvivalentna količina toplote koja se gubi zbog nepotpunog sagorijevanja, Qo – ostali toplotni gubici koji je teško izmjeriti, kao što su gubici mase usljed nepotpune zaptivenosti radnog prostora, zračenje motora u okolinu, pogon nekih pomoćnih uređaja i sl.



Slika 3.48. Toplotni bilans motora

Gdje je: m_r - maseni protok izduvnih gasova, c_{pr} - srednja specifična toplota produkata sagorijevanja pri p = const, T_r - temperatura produkata sagorijevanja, m_v - maseni protok usisnog vazduha, c_{pv} - srednja specifična toplota vazduha pri p=const, T_v - temperatura usisnog vazduha.

Literatura:

Ćuprić, N. (2019). Mehanizacija u šumarstvu: Praktikum sa izvodima iz teorije i rešenim zadacima. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.

Filipović, I. (2006). Motori i motorna vozila. Tuzla: Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet.

Globočki-Lakić, G. (2023). Mehanizacija u šumarstvu: Separati predavanja i vježbi. Banja Luka: Šumarski fakultet.

Marin, R. (2015). Elektronika automobila i 4-taktni motori. Zagreb: AutoMart d.o.o.

Medica, V. (2006). Toplinski strojevi I – volumetrijski strojevi. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet.

Milašinović, A., & Knežević, D. (2010). Tehnologija tehničkog pregleda vozila. Doboj: Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Saobraćajni fakultet.

Pešić, R., Petković, S., & Veinović, S. (2008). Motorna vozila i motori – oprema. Banja Luka i Kragujevac.

Popović, G. (2006). Tehnika motornih vozila. Zagreb: Hrvatska obrtnička komora, POU Zagreb.

Popović, S., & Miljić, N. (2018). Motori SUS – Praktikum. Beograd: Mašinski fakultet.

Torović, T., & Antonić, Ž. (1997). Osnovi motora SUS. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.

Veinović, S. (1980). Automobilski motori I i II. Beograd: Naučna knjiga.

4. ISTORIJSKI RAZVOJ MEHANIZACIJE U ŠUMARSTVU

Gazdovanje šumama i šumarstvo u cjelini imaju niz specifičnosti, uključujući širok spektar raznih, često međusobno povezanih i uslovljenih aktivnosti koje se moraju obavljati da bi se postigao određeni rezultat. Te aktivnosti obuhvataju sječu i transport drveta prema potrošačima, pošumljavanje, proizvodnju sadnica u šumskim rasadnicima i druge. One se uglavnom provode u složenom spoljašnjem okruženju koje snažno utiče na metode i sredstva rada. Jedna od tipičnih karakteristika proizvodnih djelatnosti u šumarstvu je rukovanje voluminoznim i rasutim predmetima rada, koji predstavljaju značajan potencijalni izvor opasnosti po čovjeka i šumski ekosistem.

Prilikom izvođenja radova u šumarstvu, uvijek je potrebno potpuno poštovati principe pravilnog rukovanja alatima i mašinama, kako bi se štete svele na minimum. Složenost i raznovrsnost uslova proizvodnje, kao i nepostojanje odgovarajuće mehanizacije, rezultirali su visokim udjelom ručnog rada u šumarstvu, u poređenju s drugim sektorima industrijskog karaktera. Uprkos tehničkom napretku, značajan udio manuelnog rada opstaje u šumarstvu do danas.

Dugo vremena su šumarske operacije uglavnom bile izvođene ručno, ali mogućnosti za dalja poboljšanja i razvoj alata koji su se koristili, kao što su testere, sjekire i konjske saonice, postale su veoma ograničene do oko 1900. godine (Silversides, 1997; Hellström et al., 2008)

Do razvoja mehanizacije radova u šumarstvu dolazi tek u drugoj polovini 20. vijeka, kada se postepeno uvode oprema i uređaji za sve osnovne proizvodne faze. Posebno su se uveli za sječu, preradu, transport drveta, skladištenje i manipulaciju, kao i za zemljane radove, građevinske poslove i prateću proizvodnju. Mehanizacija je smanjila težak ručni rad, povećala efikasnost, a često i kvalitet. Mehanizacija šumarstva počela je mnogo kasnije od mehanizacije poljoprivrede (Silversides, 1997), s uvođenjem motorne testere za sječu i traktora za privlačenje. Ipak, postojali su neki rani primjeri tehničkih inovacija u šumarstvu. Prve motorne testere dovoljno lagane da ih rukuju samo dvije osobe razvijene su u SAD-u i Švedskoj 1916-17. godine (Sundberg 1978, Silversides 1997).

Istorijski razvoj počinje korišćenjem animalne snage i jednostavnog alata u obliku sjekire od kamena, koji je pronađen u pećini kod Abbevila u Francuskoj i datira od prije 500.000 godina, pa sve do upotrebe visokomehanizovanih multifunkcionalnih mašina, kao što su harvesteri i forvarderi. Tehnološki napredak u šumarstvu išao je u pravcu omogućavanja lakšeg i jednostavnijeg rada radnicima uz povećanu produktivnost. Mehanizacija u šumarstvu je u najužoj vezi s korišćenjem šuma, ali je za provođenje mjera iz uzgoja, zaštite, rasadničarstva i drugih disciplina u šumarstvu neophodan veći ili manji upliv mehanizovanih sredstava (Gregur, 2015).

Kroz istoriju su se koristila raznovrsna sredstva za transport drveta, kao što su parni brodovi i šumske željeznice s vagonima koje su vukli animali. U periodu od 1890. do 1930. godine u šumarstvu su se uveliko koristile šumske željeznice s parnim lokomotivama. Veliki napredak u

transportu drveta ostvaren je izumom dizel i dizel-električnih lokomotiva. Transport je postao efikasniji i ekonomičniji, a zadržao se ponegdje sve do kraja 20. vijeka. Početkom druge polovine 20. vijeka u šumarstvo se uvode kamioni za prevoz drveta koji potiskuju željeznice i ostaju dominantan vid prevoza sve do danas.

Veliku revoluciju u šumarstvu donio je izum motornih testera s dvotaktnim motorom. Kasnije su se počeli koristiti zglobni traktori (skideri) za privlačenje oblog drveta. Skideri često rade u kombinaciji sa sjekačem koji je istovremeno i pomoćno radnik - kopčaš. Posljednjih decenija u šumarstvu se koriste neke od relativno savremenijih tehnoloških inovacija kao što su: mobilne i stacionarne žičare, kamioni s hidrauličnom dizalicom, adaptirani šumski traktor, iverač, forvarder, harvester, harvarder, helikopter i dr. (Krpan, 2013).

Razvoj mehanizacije u šumarstvu je direktno povezan sa otkrićima, saznanjima i razvojem u nauci i tehnologijama. Najviše se odražava nakon otkrića različitih metala, poput željeza, bakra i ostalih legura. Velike promjene u industriji donijelo je otkriće parne mašine krajem 18. i početkom 19. vijeka, a sljedeći jak podsticaj bio je razvoj motora sa unutrašnjim sagorijevanjem sredinom i krajem 20. vijeka. Dva svjetska rata koja su slijedila značajno su uticala na razvoj inovacija i ideja. Godine 1952. samo 20% celuloznog drveta u istočnoj Kanadi bilo je sječeno motornim testerama, ali do 1960. godine taj procenat porastao je na skoro 100% (Silversides, 1997). Trendovi u evropskim zemljama bili su slični, a brojne fabrike motornih testera bile su izgrađene u Švedskoj i Njemačkoj. Motorne testere su se i dalje koristile u punom kapacitetu u prorednim u Skandinaviji sve do početka 1990-ih, kada su ih zamijenili harvesteri (Lidén, 1995).

Mnogi pokušaji upotrebe traktora u šumarstvu u Sjevernoj Americi počeli su od 1920-ih godina (Silversides, 1997). Važan korak u mehanizaciji bio je kada su 1925. godine traktori mogli biti opremljeni vitlima (Brown, 1949). Više od 8000 mašina bilo je u upotrebi u kanadskom šumarstvu 1950. godine, tri puta više nego 1945. godine (Silversides 1997). Mnogi gusjeničari za privlačenje izumljeni su u Sovjetskom Savezu oko 1950. godine i u Sjevernoj Americi tokom 1950-ih godina (Andersson, 2004), a skider s zglobnim upravljanjem izumljen je 1959. godine (Silversides, 1997). Pored toga, nekoliko mašina za mehanizovanu sječu, utovar i privlačenje drveta izumljeno je tokom 1950-ih godina, kao i mašine za kresanje grana i rezanje trupaca uz put (Silversides, 1997).

Veliki skok u mehanizovanju sječe i privlačenja desilo se nešto kasnije u skandinavskim zemljama nego u Sjevernoj Americi, iako su neki rani modeli skandinavskih traktora za privlačenje proizvedeni još početkom 1930-ih godina (Drushka i Konttinen, 1997).

Prvi švedski specijalizovani šumski traktor predstavljen je 1957. godine i proizveden je u velikim količinama (Hellström et al., 2008). Uvođenje prve hidraulične dizalice 1959. godine, montirane na traktore, bilo je veoma važan razvoj za skandinavsko šumarstvo (Hellström et al., 2008).

Na prelazu iz 1960-ih u 1970-te, kompanije OSA, Lokomo, Kockum i Volvo uvele su prve mašine za sječu i privlačenje u šumarsku praksu u Finskoj i Švedskoj. Napori konstruktora tih mašina su u početku bili uglavnom usmjereni na faze obrade drveta koje su zauzimale najviše vremena, kao što je kresanje grana. Nekoliko različitih rješenja je uvedeno u praksu, koja su kombinovala kresanje drveta sa obaranjem ili prerezivanjem. Na početku, sječne glave su bile opremljene sa jednim ili dva noža, a kasnijim razvojem išlo se u pravcu reznog alata s lancem, koji se smatra efikasnijim. Zatim su u praksu uvedeni feler-bančeri, koji su u početku bili na Caterpillar podvozju bez hidraulične dizalice, a kasnije su to bili četvero ili šesterotočkaši opremljeni hidrauličnom dizalicom. Prvi harvesteri su konstruisani kao dvozahvatne mašine (eng. two-grip), gdje su faze obaranja i obrade stabla vršene posebno, različitim uređajima. Sve mašine razvijene u tom periodu bile su namijenjene za glavne (čiste) i sanitarne sječe. Do kraja 1980-ih godina predstavljeni su prvi jednozahvatni (eng. single-grip) harvesteri, gdje su sječa, kresanje i obrada stabla bili dio integralnog procesa koji se obavljao harvesterskom glavom montiranom na kraju hidraulične dizalice. Ove mašine su se mogle koristiti i u prorednim sječama. U poređenju s ostalim do tada poznatim tehnologijama, višefunkcionalne mašine za sječu i privlačenje ponudile su mnogo više standarde kada je riječ o ergonomiji i zaštiti zdravlja radnika, kao i mnogo veću produktivnost.

Iskorišćavanje šuma, odnosno proizvodnja šumskih drvnih sortimenata, obuhvata dvije glavne faze: sječu i izradu drveta te transport drveta. Transport drveta se dalje dijeli na dvije podfaze. Prva podfaza podrazumijeva transport drveta od panja do šumskog, odnosno pomoćnog stovarišta. U ovoj fazi se najčešće koriste traktori (skideri), forvarderi i žičare. Druga podfaza obuhvata prevoz drveta od šumskog stovarišta do pogona za preradu ili do krajnjeg potrošača.

Kada je u pitanju šumarstvo u Bosni i Hercegovini, prema Halilović (2017), tek od 1951. godine dolazi do značajnijih promjena u eksploataciji šuma. Počinju značajna ulaganja u izgradnju šumskih komunikacija, pa se transport drveta sve više orijentiše na kamione i kamionski transport. Animalnu zapregu u fazi privlačenja zamjenjuju traktori i druga mehanizovana sredstva. Pri sječi drveta se sve više koriste motorne testere. Period od 1960. godine se smatra periodom intenzivnog uvođenja mehanizacije u šumarstvo Bosne i Hercegovine. Uporedo s uvođenjem mehanizacije u fazi iskorišćavanja šuma ide razvoj i upotreba mehanizacije na radovima izgradnje šumskih transportnih komunikacija, radova na uzgajanju i zaštiti šuma i drugih aktivnosti (Halilović, 2017).

Proizvodne faze i aktivnosti u šumarstvu predstavljene su relativno velikim brojem raznovrsnih operacija i radnji koje se vrše odgovarajućim radnim sredstvima, kako onima koja se koriste već decenijama, tako i savremenim sredstvima koja prate nove tehnološke pravce razvoja. U šumskim radovima dugo su preovladavali ručni alati i upotreba animalne snage.

Ručni alati se mogu definisati kao prenosiva tehnička sredstva jednostavne konstrukcije bez motornog pogona, koja se koriste direktno u proizvodnji ili pri održavanju drugih tehničkih sredstava u pojedinim radnim operacijama u šumarstvu. Na osnovu njihovog značaja i upotrebe, alati se mogu dalje podijeliti na glavne alate (ručna testera, sjekira) i pomoćne alate

(klinovi, capini, guljači kore). Značaj ručnog alata za obavljanje radnih djelatnosti u šumarstvu počinje opadati tek od druge polovine 20. vijeka, s početkom procesa uvođenja mehanizacije.

Udio upotrebe ručnih alata trenutno je veoma neujednačen u pojedinim fazama rada, a obim njihove upotrebe zavisi od stepena razvoja i dostupnosti mehanizacije. Na primjer, alati za sječu danas se koriste u ograničenom obimu u sječi i njezi sastojina, jer su ih motorne testere, šumski čistači i druge mašine (harvesteri) zamijenili u nizu radnih operacija. Još uvijek preovladava upotreba ručnog alata u poslovima sadnje i zaštite šumskih zasada. Može se konstatovati da se u savremenim tehnologijama rada u šumarstvu koriste kako tehnička sredstva najjednostavnijih konstrukcija, kao što su ručni alati i animali, tako i sredstva za motor-manuelni rad, kao i radna sredstva za sofisticiranu, potpuno mehanizovanu proizvodnju.

Proces radova u šumarstvu je okarakterisan kao proces zamjene neposrednog ljudskog rada mašinama i opremom (sredstva mehanizacije) u skladu s opštim konceptom mehanizacije proizvodnje u prvoj fazi, a u narednim fazama kao proces zamjene rada manje sofisticiranih sredstava višim oblikom sofisticiranijih radnih sredstava. Uklanjanje teškog manuelnog rada i povećanje produktivnosti, kao i kvaliteta rada, primarni je cilj uvođenja mehanizacije. Čovjek nastavlja biti neposredni kontrolni element tokom proizvodnje čak i na njenom najvišem tehnološkom nivou. Stoga se proces mehanizovanja rada u tehnološkom razvoju može smatrati fazom koja prethodi automatizaciji proizvodnje.

Na osnovu stepena mehanizacije moguće je razlikovati djelimičnu mehanizaciju (eng. partial), gdje su samo neke faze proizvodnje mehanizovane, punu mehanizaciju (eng. full-mechanisation), mehanizaciju malog obima (eng. small-scale), koja podrazumijeva jednostavnija sredstva, i mehanizaciju velikog obima (eng. large-scale), koja koristi složenija i veća sredstva koja suštinski utiču na tehnologiju.

Period od 1950. do 1960. godine karakterišu ručni i motorno-manualni sistemi i povezan je s ekstenzivnom upotrebom animala, uglavnom konja i volova, uz manju količinu mehanizovane opreme za izvoz drveta. Primarne transportne operacije povezane s animalima bile su potpomognute kliznim posudama, sankama i prikolicama na točkovima. U ovoj fazi, motorna testera nije ostavila značajan trag, već je obaranje i presijecanje vršeno uglavnom sjekirama, lučnim testerama i testerama za poprečno rezanje. Mašinska oprema nije konstruisana namjenski za šumarstvo; umjesto toga, uglavnom je korišćena oprema prvobitno projektovana za upotrebu u građevinarstvu i prilagođena za šumarstvo. Produktivnost je ostala prilično niska i veliki broj ljudi je radio u šumi proizvodeći ograničenu količinu drveta.

S uvođenjem nove generacije lake profesionalne motorne testere u periodu između 1960. i 1970. godine, rad u šumama postao je daleko više koncentrisan s povećanom sposobnošću sječe veće količine drveta uz manje truda i vremena. Produktivnost je dramatično porasla. U isto vrijeme u šumi su počele da se pojavljuju prve namjenske mašine za šumarstvo koje se prvenstveno bave preradom i primarnim transportom. Korišćeno je sve više poljoprivrednih

traktora i poluprikolica, a zglobni tegljač je uveden iz SAD-a i Kanade. Produktivnost je porasla s prosječnih 2 m³/čovjek-dan na oko 7 i 8 m³/čovjek-dan u kratkom vremenskom periodu.

U periodu između 1970. i 1980. godine došlo je do postepenog prelaza s deblovnog metoda sječe i izrade (eng. tree-length) na sortimentni metod (eng. cut-to-length), posebno u Evropi i Skandinaviji. U šumu je uvedena specijalizovana oprema za sječu, kao što su harvesteri i feler bančeri. Dvozahvatni harvester bio je u procesu usavršavanja i bio je u radnoj kombinaciji s forvarderom (primarni transport) u sortimentnom sistemu sječe i izrade. Značajna unapređenja viđena tokom 1960-ih u ovoj deceniji izostala su, jer su brojne inovacije bile u fazi razvoja i višestruko rukovanje je još uvijek bilo evidentno, na primjer dvozahvatni harvester. Godine 1982. U Švedskoj sav rad na privlačenju i većina radova na sječi bio je mehanizovan (Andersson, 2004). Za finalne sječe korišćena je kombinacija tri mašine (feler-bančer, različite vrste procesora za kresanje i prerezivanje, i forvarder) za sječu 50% ukupne mase. Još 20% obima sječeno je pomoću dvozahvatnih harvestera (DGHs). Međutim, motor-manuelna sječa i obrada još uvijek su se primjenjivale, čineći nešto više od 20% ukupnog obima proizvodnje te godine (Nordfjell et al., 2011).

Osamdesetih godina prošlog vijeka došlo je do brzog povećanja produktivnosti s oko 10 m³/čovjek-dan na 14 m³/čovjek-dan. Razlog za ovo povećanje je uvođenje superiornog jednozahvatnog (eng. single grip) harvestera u prorede i čiste sječe. Naročito je vidljivo povećanje produktivnosti kod tanjih sastojina u Evropi, Skandinaviji i Sjevernoj Americi. Takođe, uvedene su prve operacije iveranja u sastojini. Logistika je počela da igra sve veću ulogu u lancu snabdijevanja od panja do kupca. Žičare su počele da budu kompaktnije i kraćeg dometa, da bi bile prilagođene za rad u sastojinama s prorednim sječama.

Mehanizacija sječe može se podijeliti u šest faza prema Silversidesu (1997), u kojima su sredstva koja su se koristila pretežno bila: manuelni alati i radne životinje; različite kombinacije manuelnih alata; motorno-manualni alati; manuelno upravljane mašine; mašine koje automatski obavljaju neke ponavljajuće radne elemente i mašine koje koriste povratne informacije iz procesa za kontrolu sljedećeg radnog elementa (npr. harvester s računarom za prerezivanje trupaca). Međutim, dodatna faza mehanizacije će se desiti kada se razviju mašine bez operatera koje mogu raditi autonomno (Gellerstedt et al., 1996).

U periodu između 1990. i 2000. godine sertifikacija šuma i filozofija održivog gazdovanja šumama postaju sve značajniji. Ova promjena imala je neposredan uticaj na sisteme iskorišćavanja šuma u smislu smanjenja uticaja, unapređenja biodiverziteta i održavanja trajnosti. Intenzivno istraživanje i razvoj koncentrisani su na višefunkcionalne savremene mašine kao što su Plustech - hodajući harvester i harvarder. Cilj je ostao da se ograniči šteta na sastojini i redukuje broj ljudi koji rade u šumi. Značajan napredak je napravljen i u pogledu rada na strmim terenima. Tehnološka poboljšanja, kao što su kabine s nivelisanjem na harvesterima i forvarderi koji mogu da savladaju strmije terene, uvedeni su na tržište.

U smislu poboljšanja iskorišćenja, kvaliteta i prinosa drveta, koristi se proizvodni lanac sječa-kresanje-koranje-iveranje ili iveranje u sječini nakon stablovnog metoda sječe (eng. full-tree).

Koranje harvestrima u okviru brzorastućih režima eukaliptusa i skeniranje unutrašnjosti trupaca od strane harvestera postali su stvarnost. Daljinska detekcija, informacione i komunikacione tehnologije (IKT) i sofisticirane tehnike upravljanja lancem snabdijevanja postale su obavezne u kontroli zaliha i smanjenju vremenskog okvira trajanja isporuke od panja do kupaca.

Literatura:

Andersson, S. (2004). Skogsteknik förr och nu. The Swedish Society of Forest History, 102-116.

Brown, N. C. (1949). Logging: The principles and methods of harvesting timber in the United States and Canada.

Drushka, K., & Konttinen, H. (1997). Tracks in the Forest: The Evolution of Logging Machinery. Timberjack Group, Helsinki, Finland. 254 pp.

Gellerstedt, S., Asplund, C., & Waesterlund, I. (1996). Robotics with Applications to Forestry: Documents from a Course in the Nordic Postgraduate School [20-24 November 1995, Garpenberg]. SLU, Institutionen foer Skogsteknik.

Gregur, J. (2015). Povijest mehanizacije u šumarstvu (Završni rad). Preuzeto s https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:449616

Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T., & Ringdahl, O. (2008). Autonomous forest machines: Past, present and future. Technical report published by the Department of Computing Science, Umeå University.

Krpan, A. P. B. (2013). Iz povijesti šumarstva. Akademija šumarskih znanosti, Hrvatsko šumarsko društvo, Zagreb. 1-16.

Lidén, E. (1995). Inquiries into harvesting systems, quantities, and machine ownership in Swedish industrial forestry-status 1985/86 and 1992/93 and prediction for 1997/98. Uppsatser och Resultat-Sveriges Lantbruksuniversitet, (273).

Nordfjell, T., Björheden, R., Thor, M., & Wästerlund, I. (2010). Changes in technical performance, mechanical availability and prices of machines used in forest operations in Sweden from 1985 to 2010. Scandinavian Journal of Forest Research, 25(4), 382-389.

Silversides, C. R. (1997). Broadaxe to flying shear: The mechanization of forest harvesting east of the Rockies. National Museum of Science and Technology. Transformation series 6. Ottawa.

Sundberg, U. (1978). Teknik i skog. I: Skogshögskolan 150 år. Problem och idéer i svenskt skogsbruk 1828-1978. Liber förlag. Stockholm, Sweden. ISBN 91-7088-979-1.

5. MAŠINE ZA SJEČU I IZRADU

Iskorišćavanje šuma je proces proizvodnje šumskih drvnih sortimenata, tj. niz međusobno povezanih i zavisnih radnji i postupaka pri proizvodnji drveta, a čine ga sječa i izrada, te transport drveta (Poršinsky, 2005). Sječa stabala obuhvata niz postupaka koji se trebaju izvesti na pravilan i siguran način, kako bi se stablo bez opasnosti i štete dovelo iz dubećeg položaja na zemlju (Krpan, 1992).

Sječa drveta se u prošlosti izvodila sjekirom i ručnim testerama. Najpoznatije ručne testere bile su tzv. čavlarice i amerikanke. Osim testera, koristile su se i sjekire, koje su postojale u više tipova. Jedne su se koristile za sječu tvrdog i mekog drveta, druge za obaranje, a treće za kresanje grana. Sjekire su bile teške od 0,4 do 3,0 kg. Danas su sjekire pomoćni alat i uglavnom su univerzalnog tipa. Pored sjekira, koriste se i razni drugi pomoćni alati kao što su klinovi, obrtači, capini, maklje, i drugi.

Tek 60-ih godina prošlog vijeka motorne testere su u značajnijoj mjeri uvedene kao alat koji djelimično mehanizuje rad u sječi. Krajem 1960-ih godina predstavljeni su prvi harvesteri, mašine čiji je zadatak bio potpuno isključenje manuelnog rada u sječi. Tokom 1970-ih i 1980-ih godina, harvesteri su postali sofisticiraniji i efikasniji. Od 1990-ih godina, tehnologija šumskih harvestera je napredovala sa uvođenjem modernih hidrauličnih sistema, kompjuterskih kontrola i GPS tehnologije. Moderni harvesteri mogu precizno obraditi stabla i sortirati drvo prema različitim kriterijumima, kao što su dužina i prečnik. Međutim, njihova primjena nije išla ravnomjerno u raznim dijelovima svijeta. U nekim regionima, kao što je Skandinavija, sječa i izrada bazirana na harvesterima je već odavno standard. Nasuprot tome, u zemljama jugoistočne Evrope harvesteri se tek u zadnje dvije decenije postepeno uvode u šumarstvo.

Sigurnost je izuzetno bitan aspekt kod sječe i izrade drveta, bez obzira na to da li se koriste klasične ili savremene metode. Da bi se sječa izvela na siguran način, potrebno je pridržavati se određenih postupaka prije samog pristupanja sječi i obaranju. Prije svega, treba izvršiti čišćenje podmlatka i okoline stabla, obraditi žilište i definisati smjer rušenja. Nakon sječe i obaranja stabla vrši se izrada, tokom koje se posječeno drvo obrađuje i izrađuju konačni sortimenti ili dijelovi debla, što zavisi od metode koja se primjenjuje. Izrada obuhvata kresanje grana, krojenje, prerezivanje, izradu prostornog drveta (ukoliko se izrađuje) i uspostavu šumskog reda.

Najčešće primjenjivane metode sječe i izrade drveta su sortimentna, poludeblovna, deblovna i stablovna. Metode sječe i izrade imaju direktan uticaj na tok procesa sječe i izrade (Marčeta, 2019.

- Sortimentna metoda podrazumijeva sječu stabla na sortimente odmah nakon rušenja.
- Poludeblovna metoda uključuje djelimičnu obradu stabla prije transporta.

- Deblovna metoda podrazumijeva transport cijelih debala do mjesta daljnje obrade.
- Stablovna metoda uključuje transport cijelih stabala, uključujući grane i krošnje.

5.1. Motorna testera

Motorna testera je alat koji se koristi u sječi i izradi drveta. To je prenosni uređaj kojim rukuje jedna osoba, pogonjen vlastitim motorom i opremljen beskonačnim reznim lancem s vodilicom. Postoji mnogo modela motornih testera koje se mogu podijeliti prema različitim kriterijumima, uključujući tip pogona, masu i performanse, konstrukciju, namjenu i upotrebu.

Motorne testere mogu imati različite tipove pogona, kao što su motori sa unutrašnjim sagorijevanjem (dvotaktni i četvorotaktni), elektromotori (prema vrsti izvora električne energije i naponu), hidraulični motori i pneumatski motori. Konstrukcija može varirati od standardnih do podignutih ručki, motora sa horizontalno, koso ili vertikalno postavljenim cilindrom, te elektromotora sa poprečnim ili uzdužnim montiranjem. Namjena motornih testera može biti jednonamjenska, višenamjenska ili za specijalnu upotrebu, dok se upotreba dijeli na hobi, profesionalne i testere za poljoprivrednike.

Motorne testere su opremljene motorima velike brzine, sa brojem obrtaja koji mogu ići do 12-15.000 o/min ako lanac nije montiran, odnosno do oko 9.000 o/min sa montiranom reznom garniturom, pri čemu lanac dostiže brzinu do oko 90 km/h. Najviše su u upotrebi motorne testere s dvotaktnim motorima s unutrašnjim sagorijevanjem čija je radilica direktno vezana za pogonski mehanizam reznog lanca uz pomoć automatskog centrifugalnog kvačila.

Električne testere se pogone elektromotorom, najčešće naizmjeničnom strujom s naponom do 230 V i u rasponu snage od 1,4 do 2,2 kW. One proizvode manje vibracija i buke, imaju manju težinu, mogu se koristiti u zatvorenim prostorima i ne zahtijevaju komplikovano održavanje. Pogodne su za upotrebu tamo gdje postoji stalni priključak na električnu mrežu, kao što su poslovi na pripremi ogrevnog drveta, stolarski poslovi i slično. Rukovanje, držanje i rad su slični kao kod testera s motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem. Postoje i električne testere na jednosmjernu struju od 12 ili 24 V, kao i akumulatorske testere.

Testere sa hidrauličnim i pneumatskim motorima namijenjene su za posebne namjene i ne koriste se u uobičajenoj šumarskoj praksi.

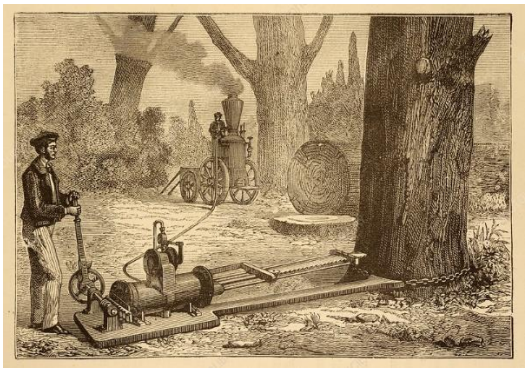
5.1.1. Razvoj motornih testera

Motorne testere su uređaji koje karakteriše rezni lanac koji se kreće po vodilici. Iako su prvi nacrti za rezni lanac nastali još u 19 vijeku, kada je u SAD-u 1858 g. patentiran „beskrajni sekcioni mehanizam za rezanje“ od strane Harvey Brown-a, sve ipak još neko vrijeme ostalo na papiru zbog toga što još uvijek nije postojao uređaj koji bi lanac pokretao dovoljno brzo za rezanje drveta (Kranjec i Poršinsky, 2011).

Na prostoru bivše Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije (SFRJ) motorne testere su se počele pojavljivati neposredno nakon Drugog svjetskog rata. Tadašnje motorne testere su

bile glomazne, predviđene za rad sa dva radnika. Iako su početni rezultati rada motornim testerama bili dobri njihov broj je počeo opadati i potpuno se nestale iz operativne upotrebe. Kao razlozi za to se navode loša edukacija radnika, nedostupnost rezervnih dijelova i školovanih servisera, loša organizacija rada, masa testera i mogućnost samo djelimične mehanizacije sječe i izrade (Kranjec i Poršinsky, 2011). Krajem 60-tih i početkom 70-tih godina prošlog vijeka počinje novi talas uvođenja mehanizacije u sječu i izradu, pri čemu se nabavljaju motorne testere kojim rukuje jedan radnik. To su uglavnim bili modeli Stihl BLK i Stihl Contra. Ovaj pokušaj je bio uspješniji i motorne testere se počinju sve više upotrebljavati. Ručne testere (tzv. „amerikanke“) padaju u drugi plan, a sjekire postaju pomoćni alat. Motorna testera Stihl Contra se može smatrati prvom modernom motornom testerom koja je imala tada savremena tehnička rješenja kao što su: direktan prenos, membranski karburator i mogućnost rada u svim položajima bez okretanja vodilice. Postojao je i izvjestan otpor radnika uvođenju motornih testera, prije svega zbog nepostojanja odgovarajaućih normi, straha da će ostati bez posla, a počela su se javljati i oboljenja radnika (oštećenja sluha, vazoneuroza) (Kranjec i Poršinsky, 2011).

Ransonova parna motorna testera (1880) je imala oštricu kao kod ručnih testera (Slika 5.1). Bila je opremljena jednim cilindrom i klipom spojenim neposredno na oštricu koja se kretala naprijed-nazad. Nekoliko takvih testera je povezivano na jedan parni kotao pomoću cijevi za dovod pare pod pritiskom. Prepreka za širu upotrebu ovog sistema je bila glomaznost i nepraktičnost.



Slika 5.1. Ransonova parna testera (https://fineartamerica.com)

U mjestu Eureka u Kaliforniji 1905. godine testirana je motorna testera s lancem koja je pokretana dvocilindričnim benzinskim motorom (Gregur, 2015). Gorivo i voda koje je koristila testera su pričvršćivani na stablo koje se obara, iznad mjesta prerezivanja i predviđeno je da se rezervoari mogu pomjerati kada bi stablo počelo padati, što je samo po sebi dosta rizično. Testera nije imala klasičnu vodilicu, već samo rezni lanac koji se obavijan oko drveta i koji je rezao prema unutra sa svih strana. Ova testera je ostala u eksperimentalnoj fazi. R. L. Muir je 1910. g. predstavio motornu testeru sa lancem i vodilicom. Konstruisana je za prerezivanja trupaca velikih prečnika a pokretana je benzinskim ili elektro motorom koji je ugrađen na kolica koja su se pokretala uz srušeno stablo. Nikad nije zaživjela u praksi, prvenstveno zbog izuzetno zahtjevnog rukovanja i postavljanja, uzrokovano prije svega masom od 680 kg.

Prva komercijalno uspješna motorna testera je nastala 1920. godine. Izumio ju je Charles Wolf, inžinjer iz Oregona (Slika 5.2). To je bila elekrična testera s lancem koja se zvala Wolf electric drive lin saw.



Slika 5.2. Wolf electric drive lin testera (https://www.thechiefnews.com)

Imala je snagu 1,5 KS, a električna energija je obezbjeđivana iz elektro mreže ili generatora. Zubi lanca su bili konstruisani po uzoru na ručne testere za prerezivanje trupaca. Mogli su rezati u oba smjera.

Prva potpuno prenosiva motorna testera s lancem za rezanje i dvotaktnim benzinskim motorom (Rinco) u Evropi je proizvedena 1925. godine od strane njemačkog preduzeća E. Ring, za koju su radili Andreas Stihl i Emil Larp (osnivač Dolmara) kao trgovački putnici (Slika 5.3). Predviđeno je da dva radnika rukuju njom.



Slika 5.3. Motorna testera Rinco (https://www.youtube.com/watch?v=GodFapKBMlI)

U isto vrijeme na području SAD-a su se proizvodile i izuzetno snažne, skupe i glomazne motorne testere, kao što je Dow koja je imala masu 209 kg, a koje su se mogle koristiti isključivo na ravnim terenima (Kranjec i Poršinsky, 2011).

Važan izum u razvoju testera je automatska uljna pumpa za podmazivanje lanca koja je oslobodila rukovaoca potrebe da ručno podmazuje lanac. Taj izum se pripisuje Andreasu Stihlu. Još jedan važan izum je centrifugalno kvačilo, oko čijeg nastanka postoji diskusija. Prema jednim izvorima prva motorna testera sa cetrifugalnim kvačilom je NSU Ural iz 1936, a

prema drugim to je izum Andreasa Stihla. Centrifugalno kvačilo je značajno unaprijedilo sigurnost radnika zbog tog što je omogućilo da lanac testere miruje u praznom hodu.
Bez obzira što su dvoručne motorne testere predstavljale napredak u odnosu na ručne, ipak su i dalje bile nepraktične, a prije svega veoma opasne za rad. Često je dolazilo do oštećenja testera i povreda radnika. U toku i nakon Drugog svjetskog rata počele su se intenzivnije razvijati motorne testere za jednog rukovaoca (Beaver, Danarm, Precision), kao i moderni rezni lanci koji su mogli rezati pod bilo kojim uglom u odnosu na drvna vlakna (eng. chipper lanci).
Prva motorna testera sa membranskim karburatorom koji je omogućavao rad u svim položajima je McCulloch 1225 A iz 1948. godine, a McCulloch 3-25 iz 1949. godine je imala ručke za držanje postavljene na način da je prednja smještena odozgo i sa strane da bi omogućila rad u svom položajima, a zadnja je smještena nisko na kućištu i držala se slično kao drška pištolja.
Intenzivniji razvoj i primjena motornih testera je započeo 50-tih godina 20. vijeka. Počele su se proizvoditi motorne testere s direktnim prenosom (IEL HA), manje mase i s bržim lancem, tako da su postajale sve popularnije. Određene motorne testere nastale u to doba su imale specifičnosti koje su ih izdvajale od uobičajnih tokova razvoja, kao što sovjetski modeli Družba i Ural koje su imale visoke ručke koje su omogućavale da radnik radi u uspravnom položaju (Slika 5.4).



Slika 5.4. Motorna testera Družba

Krajem 50-tih godina prošlog vijeka Stihl i Husqvarna, danas vodeći proizvođači motornih testera, predstavili su svoje prve modele koji su imali izgled i karakteristike jako slične današnjim motornim testerama. Husqvarna je predstavila model A90 sa motorom zapremine od 90 cm^3 i masom od 11,5 kg, a Stihl model Contra sa motorom zapremine od 106 cm^3 i 12 kg (Slika 5.5).




Slika 5.5. Husqvarna A90 (http://irvispress.ru) i Stihl Contra (https://corporate.stihl.com)

U daljem razvoju motornih testera, tokom 60-ih godina, akcenat se stavlja na smanjenje mase kako bi se olakšalo rukovanje. Neki od važnih momenata uključuju patentiranje Stihl antivibracionog sistema 1964. godine, konstruisanje Oilmatic lanca 1969. godine, kao i razvoj motorne testere Husqvarna 140, prve motorne testere s kočnicom lanca (Bohm, 1996).

Stihl razvija katalizator za dvotaktne motore 1988. godine, a prva motorna testera s katalizatorom bila je Stihl 044. Kasniji napredak motornih testera usmjeren je ka poboljšanju konstrukcije radi smanjenja mase, buke i vibracija, te povećanja efikasnosti rada. Veliki napredak postignut je primjenom plastičnih materijala i legura aluminijuma (Jezdić, 2008).

Motorne testere se upotrebljavaju za veći broj radnih operacija kao što su formiranje prizemnog dijela stabla, podsjecanje, prerezivanje, kresanje i dr. U tehničkom smislu motorna testera je kombinacija pogonske i radne mašine (Nikolić, 1990). Pogonska mašina je uglavnom dvotaktni benzinski motor, ali može biti i eletro motor, pneumatski ili hidro motor. U šumarstvu se skoro isključivo upotrebljavaju motorne testere s benzinskim motorom, s tim da su se u zadnje vrijeme intenzivirala istraživanja koja promovišu korišćenje električnih motornih testera s baterijama (Poje et al., 2018).
Trend razvoja motora za motorne testere ide u pravcu stalnog smanjivanja mase i emisije štetnih gasova, kao i poboljšanja sagorijevanja. Elektronika će sigurno omogućiti još poboljšanja na motornim testerama u budućnosti (Halilović, 2017).

5.1.2. Podjela motornih testera

Podjele motornih testera su samo indikativne i služe kao smjernice za odabir testera s obzirom na prirodu posla koji se njome namjerava obavljati. Tako, na primjer, neke testere su prihvatljivije za glavne sječe, neke za proredne sječe, a neke za njegu sastojina. Klasifikacija testera prema kategorijama kao što su profesionalne, za farmere ili hobi zavisi od materijala i konstrukcije pojedinih komponenti testere, koji utiču na udobnost rukovaoca, pouzdanost u radu i vijek trajanja testere. Što se tiče bezbjednosti na radu, sve kategorije testera moraju ispunjavati postavljene zahtjeve.
Motorne testere se mogu grupisati prema više parametara, a najčešći su radna zapremina motora, snaga i masa. Podjele motornih testera u šumarstvu imaju važnu ulogu pri planiranju

izbora optimalne testere za izvršenje određenih radova, kao i za kalkulaciju troškova. Obično su jedan od ulaznih parametara u normativima rada za planiranje proizvodnje.
U narednoj tabeli su prikazane podjele motornih testera prema Nikoliću (1990) i Verani i Speradio (2008) (Tabele 5.1 i 5.2).

Tabela 5.1. Podjela motornih testera (Nikolić, 1990)

Motorne testere prema masi (kg)		Motorne testere prema snazi (kW)	
Lake	do 5,5	Male snage	do 2
Srednje	od 5,6 do 8	Srednje snage	do 3
Teške	preko 8	Jake	preko 3

Tabela 5.2. Podjela motornih testera (Verani i Speradio, 2008)

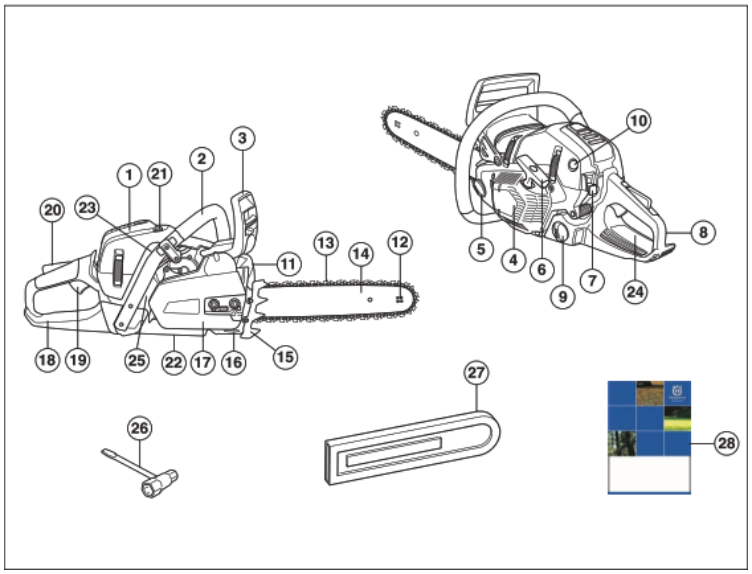
Tip	Radna zapremina (cm^3)	Snaga (kW)	Dužina vodilice (cm)	Masa (kg)
Lake	20-50	1,2-2,5	20-35	2,5-6
Srednje	40-70	2,5-4	35-50	5-8
Teške	> 70	> 4	> 50	8-16

5.1.3. Tehničke karakteristike motornih testera

Savremene motorne testere sastoje se od tri glavne jedinice: motora, reznog mehanizma i pomoćnih dijelova. Osim što moraju ispunjavati funkcionalne parametre, motorne testere moraju ispunjavati i zahtjeve sigurnog rada, odnosno ergonomske parametre. Zbog toga su opremljene raznim elementima aktivne zaštite.

Među ključnim elementima zaštite su kočnica lanca, štitnik lijeve ruke, antivibracioni sistem, prigušivač izduvnih gasova, grijana ručka i proširen donji dio zadnje ručke koji služi kao zaštita desne ruke. Takođe, testere imaju blokator ručice gasa, prekidač za paljenje motora, hvatač lanca, oslonac nazuba i zaštitni poklopac za rezni dio, među ostalim zaštitnim komponentama.

Na Slici 5.6. i u Tabeli 5.3 su prikazani osnovni dijelovi motorne testere.



Slika 5.6. Dijagram motorne testere Husqvarna (www.husqvarna.com)

Tabela 5.3. Dijelovi motorne testere

1	Pokrivač za cilindar	15	Odbojnik (osloni nazub)
2	Prednji rukohvat	16	Hvatač lanca
3	Kočnica lanca sa zaštitom od trzaja	17	Poklopac kvačila
4	Uređaj za startovanje	18	Ručka na stražnjoj strani sa zaštitom za desnu ruku
5	Rezervoar za ulje za lanac	19	Regulator gasa
6	Ručica za paljenje	20	Regulator za ograničavanje gasa
7	Kombinovani prekidač za pokretanje i zaustavljanje	21	Ventil za dekompresiju
8	Zadnji rukohvat	22	Vijak za podešavanje pumpe za ulje
9	Rezervoar za gorivo	23	Prekidač za električno grijan rukohvat
10	Pumpa za gorivo	24	Naljepnica sa informacijama i upozorenjima
11	Prigušivač zvuka	25	Pločica sa nazivom i serijskim brojem proizvoda
12	Nosni točak	26	Kombi ključ
13	Lanac pile	27	Zaštita za transport
14	Mač (vodilica)	28	Uputstvo za upotrebu

U tehničkom smislu, motorna testera je kombinacija pogonske i radne mašine. Pogonska mašina je najčešće dvotaktni benzinski motor, ali može biti i elektromotor, pneumatski ili hidromotor. U iskorišćavanju šuma se gotovo isključivo koriste benzinske motorne jednoručne testere (Nikolić, 1990).

Gotovo isključivo, motor motornih testera je dvotaktni klipni jednocilindrični, hlađen vazduhom. Cilindar i klip su liveni od lakih legura aluminijuma i magnezijuma. Klip je povezan sa radilicom klipnjačom. Koljenasto vratilo pretvara pravolinijsko kretanje klipa u rotaciono i direktno pokreće ventilator (koji je takođe rotor magneta za paljenje), a indirektno pokreće lančanik preko centrifugalnog automatskog kvačila. Prigušivač izduvnih gasova smanjuje buku motora, hladi izduvne gasove i usmjerava ih dalje od rukovaoca. Fiksiran je na zid cilindra i ima oblik čelične kutije sa lavirintom sa unutrašnje strane. Iako su savremeni prigušivači izduvnih gasova efikasni, nivo akustičnog pritiska Lpek, utvrđen u skladu sa ISO 7182, i dalje se kreće oko 100 dB (Stihl, Husqvarna). Hlađenje motora je pomoću ventilatora sa lopaticama

postavljenim na lijevom dijelu radilice koji stvara protok vazduha koji se uvlači spolja kroz otvore na poklopcu startera i izduvava ga na rebra cilindra.

Neki od poznatijih proizvođača motornih testera su Stihl, Husqvarna, Echo i Makita, a postoje i mnogi drugi. Posljednjih godina se veliki broj kineskih proizvođača probija na evropsko tržište. Tehničke karakteristike nekih od modela motornih testera su predstavljene u narednoj Tabeli:

Tabela 5.4. Tehničke karakteristike nekih modela profesionalnih motornih testera za šumarstvo (*Podaci sa zvaničnih web sajtova proizvođača*)

Proizvođač i model	Zemlja porijekla	Zapremina motora	Snaga	Masa	Zapremina rezervoara	Dužina vodilice	Korak lanca
		cm^3	kW	kg	l	cm	col
Husqvarna 562 XP	Švedska	59,8	3,5	6,1	0,65	38-70	3/8
Husqvarna 592 XP	Švedska	92,7	5,6	7,4	0,86	45-90	3/8
Stihl MS 361	Njemačka	59,0	3,4	5,6	0,68	45	3/8
Stihl MS 661 C-M	Njemačka	91,1	5,4	7,3	0,85	40-63	3/8
Echo CS-620SX	Japan	59,8	3,32	6,2	0,65	45/60	3/8
Echo CS-8002	Japan	80,7	3,93	7,6	0,82	45-70	3/8
Makita EA6101P45E	Japan	61	3,4	6	0,8	45	3/8

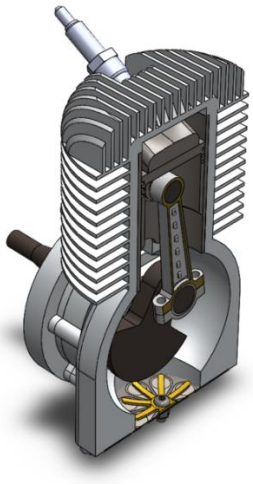
Prema Halilović (2017) motorna testera se sastoji iz tri osnovna dijela: pogonski dio, transmisioni dio i radni dio. Ovi dijelovi su povezani jednom vrstom blok šasije. Osim osnovnih dijelova motorne testere imaju ručke za držanje u toku rada, zatim sigurnosne uređaje kao što su kočnica poluge za gas, kočnica lanca, hvatač lanca, antivibracione ručke i dr.

Motor motorne testere je relativno malih dimenzija i zapremine. Mnogi njegovi dijelovi kao što su klip, cilindar, i dr. su izrađeni od legura aluminijuma. Pokretanje motora je ručno, a paljenje elektro-magnetno.

5.1.3.1. Pogonski sklop motorne testere

Motor je osnova pogonskog sklopa motorne testere. Uglavnom se koriste jednocilindrični, dvotaktni benzinski motori s unutrašnjim sagorijevanjem i vazdušnim hlađenjem. Postoje i modeli s četverotaktnim motorom, ali nemaju širu primjenu u šumarstvu. Dvotaktni motori su prvi izbor za motorne testere zbog toga što imaju vrlo jednostavnu konstrukciju, bez ventila i drugih dijelova koji opterećuju četverotaktne motore, tako da su laganiji i jeftiniji za proizvodnju (Nikolić, 1990).

Glavni dijelovi motora kod motorne testere su: cilindar, klip s klipnim prstenovima, klipnjača, radilica, karter i zamajac (Slika 5.7).



Slika 5.7. Šema motora motorne testere (https://grabcad.com)

Cilindar motora služi kao prostor unutar kojeg se klip kreće kao posljedica promjene pritiska koji nastaje sagorijevanjem smješe goriva i vazduha. Kod savremenih motornih testera cilindar je jednodijelan i izrađen od lakih legura (Jezdić, 2008). Na vanjskoj strani cilindra se nalaze rebra za hlađenje. S unutrašnje strane cilindra se nalazi otvor za svjećicu koja pali smješu, zatim otvor koji služi da dovod smješe i otvor koji služi za odvod sagorjelih gasova. Postoji i prelivni kanal koji služi da se smješa goriva i vazduha iz kartera prevede u kompresioni prostor. Mnoge motorne testere novije proizvodnje na gornoj strani cilindra imaju i dekompresioni ventil, koji se aktivira prilikom startovanja, i koji ima ulogu da smanji kompresiju motora i olakša samo startovanje. Ovo je posebno važno kod testere s većom zapreminom motora. Kompresioni ventil može biti mehanički ili automatski.

Klip obično ima oblik valjka i služi za pokretanje klipnjače i radilice. Istovremeno otvara i zatvara prelazni kanal, otvara otvore za ispust sagorjelih gasova i reguliše ulazak smješe u karter. Zadatak klipa je da silu koja se stvara eksplozijom smješe u cilindru prenese na radilicu motorne testere (Halilović, 2017). Na klipu se nalaze klipni prstenovi (karike) koje sprečavaju prodor gasova iz kompesionog prostora i prenose toplotu na tijelo cilindra i rebra za hlađenje. Klipni prstenovi, kojih ima ili jedan ili dva, su presječeni na jednom mjestu da bi se omogućila određena tolerancija u širenju i sakupljanju, da ne bi došlo do zaglavljivanja (Nikolić, 1990).

Klipnjača je veza između klipa i radilice. Njen zadatak je da pravolinijsko kretanje klipa pretvori u kružno kretanje radilice. Sastoji se od tijela, „velike pesnice“ (veza s radilicom) i „male pesnice“ (veza s klipom).

Radilica ili koljenasto vratilo je važan dio motora koji je preko valjkastih ležajeva povezan na kućište motorne testere. Izrađuje se od veoma kvalitetnih legura čelika. Uloga radilice je da prenosi silu koja nastaje sagorijevanjem i kretanjem klipa, i da je pretvori u obrtni momenat na izlaznoj osovini (Halilović, 2017). Na jednoj strani radilice ugrađuje se lančanik, a na drugoj uređaj za pokretanje testere, elektrouređaj i provjetrivač (Dereta, 1986). Izrađuju se iz jednog ili više dijelova. Na radilici se nalaze i tegovi koji su kontrateža klipu i koji omogućavaju miran rad motora.

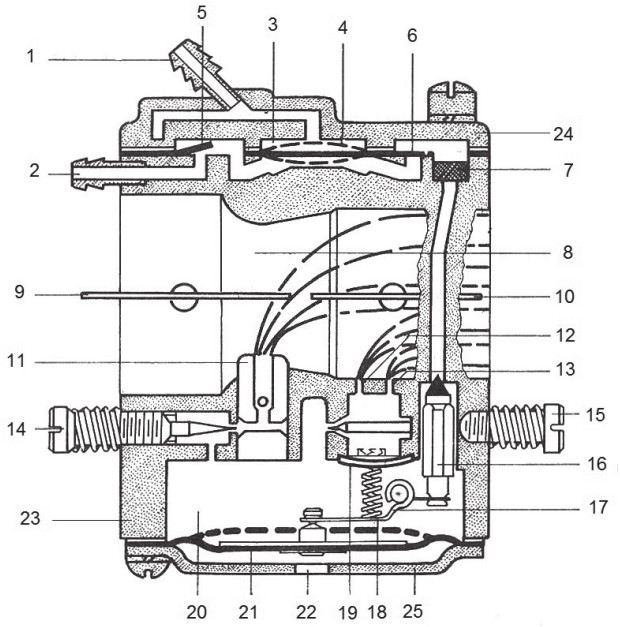
Kućište motorne testere je osnova na koju se montiraju svi ostali dijelovi. Karter je dio kućišta motora koji se nalazi ispod cilindra. U kućištu se nalazi radilica i kroz njega prolazi smjesa goriva i ulja (Dereta 1986). Ulje koje se dodaje u benzin služi za podmazivanje ležajeva radilice, klipnjače i zidova cilindra.

Zamajac ima ulogu pri paljenju i hlađenju. Na njemu se nalaze magneti koji pri okretanju indukuju struju koja se prenosi do svjećice i rebra koja imaju ulogu ventilatora za hlađenje motora.

Uređaj za napajanje dovodi gorivo u motor. Sastoji se od rezervoara, karburatora i filtera. Pored rezervoara za gorivo postoji i rezervoar za ulje koje podmazuje radni sklop motorne testere.

Karburator motorne testere je ključna komponenta u procesu sagorijevanja, jer miješa vazduh i gorivo u o

dgovarajućim proporcijama prije nego što smjesa uđe u motor (Slika 5.8). Radi na principu Bernulijevog zakona, gdje prolaz vazduha kroz suženi dio stvara potpritisak koji povlači gorivo iz rezervoara. Približan omjer smjese je 1:15, odnosno na 1 kg benzina treba 15 kg vazduha. Već dugo vremena u motorne testere se ugrađuje uglavnom membranski karburator, koja ima osobinu da omogućava rad testere u svim položajima.



Slika 5.8. Shematski prikaz karburatora (Halilović, 2017)

	Legenda				
1	Impulsni kanal	10	Poklopac/leptir za smjesu	19	Čep
2	Dovod goriva	11	Glavna dizna – mlaznica	20	Membranska komora
3	Impulsni prostor	12	Sekundarna dizna	21	Membrana za regulisanje doticanja
4	Membrana pumpe	13	Primarna dizna	22	Veza sa atmosferom
5	Ulazni ventil	14	Glavni vijak za gorivo (H)	23	Kućište karburatora
6	Izlazni ventil	15	Vijak za prazni hod (L)	24	Poklopac za membranu pumpe
7	Sito za gorivo	16	Igla za gorivo	25	Poklopac uz membranu za regulisanje
8	Venturijeva cijev	17	Poluga za regulisanje doticanja		
9	Poklopac/leptir startera – čok	18	Opruga		

Sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova: tijelo karburatora, mlaznica za gorivo, ventil za vazduh (leptir gas), igličasti ventil, plovak ili dijafragma, i sistem za podešavanje smjese.

Tijelo karburatora sadrži prolaze i kanale kroz koje prolaze vazduh i gorivo. Mlaznica za gorivo omogućava doziranje goriva u struju vazduha. Ventil za vazduh reguliše količinu vazduha koja ulazi u karburator, a time i količinu smjese koja ulazi u motor. Igličasti ventil i plovak ili dijafragma kontrolišu nivo goriva u karburatoru. Kada se nivo goriva smanji, plovak se spušta i otvara igličasti ventil, omogućavajući gorivu da uđe u komoru karburatora. Kada nivo goriva dostigne određenu tačku, plovak podiže igličasti ventil i zatvara dovod goriva, održavajući stalan nivo goriva.

Pumpa membrana je povezana sa kućištem preko tzv. impulzionog kanala. Kada se promijeni pritisak u kućištu uslijed kretanja klipa u cilindru mijenja se položaj membrane koja pod pritiskom šalje gorivo u karburator. Druga, tzv. regulišuća membrana s gornje strane u vezi se s difuzorom, a s donje strane izložena je atmosferskom pritisku. U radnom taktu klipa regulišuća membrana otvara dovod goriva povlačeći jednu iglu (ventil). Kada se membrana vrati u prethodni položaj, tada posebna opruga zatvara dovod goriva podižući ventil. Membranski karburator je kombinacija pumpe i karburatora. Pumpna membrana ima ulogu pumpe, a regulišuća ulogu plovka. Na karburatoru motorne testere postoje dva vijka pomoću kojih se podešava količina goriva, jedan za glavni (H) i drugi za prazan hod (L) (Nikolić, 1990). Podešavanja se vrše da bi se kompenzovale razlike u kvalitetu goriva, gustoći vazduha zbog promjene nadmorske visine i temperature vazduha. Kod modernih motornih testera za određivanje optimalnih parametara rada koriste se mikroprocesori koji su ugrađeni u kućište ventila i nadgledaju broj obrtaja motora i smješu goriva i vazduha, odnosno vrši se automatsko podešavanje karburatora. To je ogromna prednost u odnosu na ručno podešavanje. Nema gubljenja vremena i podešavanje ne zavisi od subjektivnog osjećaja i znanja motoriste. Na karburatoru se nalazi filter vazduha koji ima veoma važnu ulogu u radu motorne testere. U njemu se pročišćava vazduh koji se koriste za pravljenje smješe i sagorijevanje. Izrađuje se od tkanine ili žičane mrežice. Za ispravan rad motorne testere filter treba redovno čistiti, i po potrebi mijenjati.

Elektronsko ubrizgavanje goriva (EFI) predstavlja naprednu tehnologiju koja je u poslednjim decenijama našla primjenu u motorima motornih testera, značajno unapređujući njihove performanse, efikasnost i ekološku prihvatljivost. Za razliku od tradicionalnih karburatorskih sistema, EFI koristi elektronski kontrolisane injektore za precizno doziranje goriva direktno u cilindar motora. Ovaj sistem se oslanja na niz senzora koji prikupljaju podatke o različitim parametrima rada motora, kao što su temperatura, pritisak vazduha, broj obrtaja i položaj leptira gasa. Na osnovu ovih podataka, elektronska kontrolna jedinica (ECU) prilagođava količinu ubrizganog goriva, čime se optimizuje sagorevanje u realnom vremenu. EFI sistemi su posebno korisni za motorne testere koje se koriste u različitim radnim uslovima, jer omogućavaju pouzdan rad motora u širokom opsegu temperatura i nadmorskih visina, smanjujući rizik od zastoja i povećavajući produktivnost. Jedna od ključnih prednosti EFI tehnologije je smanjenje emisije štetnih gasova, što doprinosi očuvanju životne sredine. Precizno doziranje goriva rezultira potpunijim sagorevanjem, smanjujući emisije ugljen-monoksida (CO), ugljen-dioksida (CO_2) i neizgorenih ugljovodonika (HC) (Niinikoski et al.,

2016). Ovo je posebno značajno u kontekstu sve strožijih ekoloških regulativa koje se primenjuju na motorne testere širom sveta. Pored ekoloških benefita, EFI sistemi poboljšavaju i potrošnju goriva. Motorne testere sa EFI tehnologijom troše manje goriva za obavljanje istog posla u poređenju sa modelima sa karburatorom, što rezultira smanjenjem operativnih troškova za korisnike. Takođe, EFI sistemi smanjuju potrebu za čestim podešavanjima i održavanjem, jer automatski prilagođavaju rad motora promenama u radnim uslovima. To znači manje vremena provedenog u servisu i više vremena za rad, što je ključno za profesionalne korisnike koji se oslanjaju na motorne testere za svakodnevne zadatke. EFI tehnologija takođe doprinosi povećanju dugovečnosti motora. Precizna kontrola ubrizgavanja goriva smanjuje habanje unutrašnjih komponenti motora, kao što su klipovi i cilindri, jer se izbegava prekomerno ili nedovoljno podmazivanje. Ovo rezultira dugotrajnijim radom motora i smanjenjem troškova popravki i zamene delova. Iako EFI sistemi povećavaju početne troškove proizvodnje motornih testera, dugoročne koristi u vidu smanjene potrošnje goriva, nižih operativnih troškova, manjeg uticaja na životnu sredinu i dužeg veka trajanja motora opravdavaju ovu investiciju. Još jedna značajna prednost EFI sistema je njegova sposobnost samodijagnostike. ECU može otkriti i prijaviti potencijalne probleme sa sistemom goriva, olakšavajući održavanje i popravke.

Uvođenje EFI tehnologije u motorne testere predstavlja značajan korak ka modernizaciji šumarskih i drugih srodnih industrija, omogućavajući efikasniji, ekološki prihvatljiviji i ekonomičniji rad. S obzirom na ove prednosti, očekuje se da će EFI tehnologija postati standard u budućnosti, zamenjujući tradicionalne karburatorske sisteme i postavljajući nove standarde u industriji motornih testera.

Sistem paljenja kod motornih testera igra ključnu ulogu u procesu pokretanja i efikasnog rada motora, osiguravajući pravovremeno zapaljenje mješavine goriva i vazduha unutar cilindra. Moderni sistemi paljenja su elektronski, tiristorski i beskontaktni, čime se značajno poboljšava pouzdanost i efikasnost rada motora.

Elektronski sistem paljenja koristi tiristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier) za kontrolu protoka električne struje do svećice. Kada senzor na radilici motora detektuje da je klip blizu gornje mrtve tačke (GMT), ECU (elektronska kontrolna jedinica) šalje signal tiristoru da pusti visok napon do svećice. Na ovaj način, varnica se stvara tačno u trenutku kada je mješavina goriva i vazduha najviše kompresovana, što osigurava optimalno sagorijevanje.

Mehanizam za startovanje je još jedan kritičan deo sistema paljenja. On omogućava korisniku da započne rad motora povlačenjem užeta za startovanje, koje je povezano sa remenicom za namotavanje. Ova remenica je takođe povezana sa radilicom motora, omogućavajući da se okretaji užeta prenesu na radilicu. Prednapregnuta zavojna opruga vraća remenicu u početni položaj nakon svakog povlačenja, spremna za sledeći start. Nosači različitih izvedbi, poput čegrtaljki, kandži ili kuka, postavljeni su na remenicu za namotavanje kako bi se obezbijedila sigurnost i efikasnost prilikom startovanja.

Savremeni sistemi paljenja motornih testera takođe uključuju senzore i module koji optimizuju proces paljenja. Na primjer, senzori položaja radilice ili magneta mogu precizno odrediti tačan trenutak za paljenje, dok moduli za kontrolu varnice osiguravaju da svaka

varnica bude dovoljno jaka da zapali mješavinu. Elektronski moduli mogu takođe prilagoditi vrijeme paljenja u zavisnosti od uslova rada, kao što su temperatura motora, broj obrtaja i opterećenje, što dodatno poboljšava efikasnost i pouzdanost motora.

Prednosti elektronskog sistema paljenja uključuju brže startovanje motora, bolju efikasnost sagorijevanja i smanjenje emisije štetnih gasova. Elektronsko paljenje takođe smanjuje potrebu za održavanjem, jer nema pokretnih dijelova koji se troše, kao što su kontakti u starijim mehaničkim sistemima paljenja. Ovaj sistem omogućava motorima da rade pouzdano u širokom opsegu temperatura i uslova, što je od posebne važnosti za motorne testere koje se koriste u različitim šumarskim i građevinskim primjenama. Sistem paljenja motornih testera je identifikovan kao jedan od najčešćih uzroka kvarova i njegovom održavajnu treba posvetiti posebnu pažnju (Volkov i Kastyrin, 2020).

5.1.3.2. Uređaj za prenos snage

Uređaj za prenos snage kod motorne testere, poznat kao kvačilo, ima ključnu ulogu u prenosu obrtnog momenta sa radilice motora na lanac motorne testere. Kvačilo funkcioniše na principu frikcije (trenja) i po tipu konstrukcije je centrifugalno. Njegova primarna funkcija je da omogući zaustavljanje lanca kada motor radi u praznom hodu, te da aktivira lanac tek kada motor postigne dovoljan broj obrtaja. Ova funkcionalnost je od suštinskog značaja za sigurnost i efikasnost rada motorne testere (Pešík i Skarolek, 2014).

Kvačilo se aktivira kada broj obrtaja radilice dostigne nivo pri kojem centrifugalna sila nadjača silu opruga, obično između 1300 i 2000 obrtaja radilice u minuti. U tom trenutku, segmenti kvačila dolaze u dodir s kućištem lančanika na kome se nalazi zupčanik i pogonski prsten, omogućavajući lanac da se okreće.

Glavni dijelovi kvačila su: segmenti, nosač segmenata, opruge i kućište kvačila. Segmenti su postavljeni na nosaču i povezani su oprugama. Na obodima segmenata kvačila nalaze se feroazbestne ili sinter obloge, koje povećavaju trenje između segmenata i kućišta kvačila.

Nosač segmenata, ili tijelo kvačila, je glavni dio koji se montira na pogonsko vratilo motora. Tijelo kvačila obično ima radijalno postavljene poluge ili nosače obloga kvačila. Opruge drže obloge kvačila u povučenom položaju kada motor radi na niskim obrtajima. Kada se obrtaji motora povećaju, centrifugalna sila savladava silu opruga i obloge kvačila se šire prema vani.

Kućište, ili bubanj kvačila, je cilindrični dio koji okružuje tijelo kvačila i obloge. Kada se obloge kvačila prošire zbog centrifugalne sile, dolaze u kontakt s unutrašnjom stranom bubnja kvačila, prenoseći snagu na lanac. Bubanj kvačila je povezan s lančanikom, koji direktno pokreće lanac.

Dodatno, kvačilo ima mehanizam za automatsko odvajanje lanca kada se motor smanji na rad u praznom hodu, čime se smanjuje mogućnost nezgoda i povećava sigurnost rukovaoca. Kvačila modernih motornih testera su dizajnirana tako da budu lako servisirana i zamenjena, omogućavajući brzu i efikasnu održavanje.

Nove tehnologije u dizajnu centrifugalnih kvačila uključuju korišćenje naprednih materijala za obloge kvačila koji pružaju bolju otpornost na habanje i toplotu, što dodatno povećava pouzdanost i dugovečnost uređaja. Takođe, primjena poboljšanih sistema za balansiranje centrifugalnih sila omogućava preciznije i ravnomernije delovanje kvačila, što doprinosi glatkijem radu motorne testere i smanjenju vibracija (Slika 5.9).



Slika 5.9. Uređaj za prenos snage kod motorne testere (*https://www.amazon.com/Adefol*)

5.1.3.3. Radni sklop motorne testere

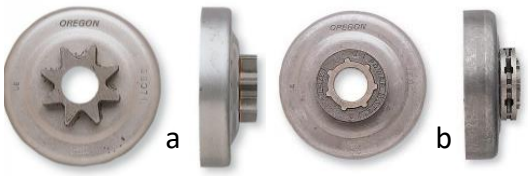
Radni sklop motorne testere čine: **lančanik, lanac, vodilica (mač), uređaj za podmazivanje lanca, uređaj za zatezanje lanca, kočnica lanca i osloni nazub,**. Osim ovih dijelova i uređaja sklop motorne testere čine: ručke za držanje, hvatač lanca, štitnici za ruke, komandni uređaji za regulisanje rada motora i dr.

Lančanik motorne testere ima ulogu da prenosi snagu sa motora na lanac, omogućavajući rotaciju lanca i, samim tim, rezanje drveta. Lančanik je spojen sa kvačilom i direktno pokreće lanac testere pri čemu prenosi snagu sa motora na lanac testere. Kada motor pokreće lančanik, on vuče lanac duž vodilice, omogućavajući mu da siječe drvo.

Postoje dva tipa lančanika, sa zvijezdom i prstenasti. Lančanik sa zvijezdom je intergalan dio gdje je zvijezda pričvršćena za tijelo lančanika, a kod prstenastog lančanika moguće je zamijeniti prsten koji je pohaban. Lančanik sa zvijezdom je najčešći tip lančanika koji se koristi na motornim testerama. Ovaj lančanik ima integrisanu zvijezdu koja je čvrsto povezana sa pogonskim vratilom. Zubi zvijezde se direktno okreću s lancem, prenoseći snagu sa motora na lanac. Prednosti lančanika sa zvijezdom su jednostavnost, robusnost i jednostavna zamjena. Jednostavan je za proizvodnju i montiranje, robustan i može izdržati visoke napore tokom rada. Međutim, kada se zubi lančanika istroše, potrebno je zamijeniti cijeli lančanik, što može biti manje ekonomično. Lančanik sa prstenom se sastoji od dvije odvojene komponente: pogonskog prstena (ili bubnja) i zamjenjivog prstena sa zupcima. Prsten sa zupcima može se lako zamijeniti bez potrebe za zamjenom cijelog pogonskog sklopa. Prednosti lančanika sa

prstenom uključuju jednostavnu zamjenu, dugovječnost i manje trenje. Kada se prsten sa zupcima istroši, može se lako zamijeniti bez potrebe za zamjenom cijelog pogonskog sklopa, što je ekonomičnije. Kod prstenastog lančanika je veća površina nalijeganja pogonskih članaka lanca, prenos snage je mirniji, sigurnije je vođenje lanca i manja opasnost od spadanja lanca (Jezdić, 2008).

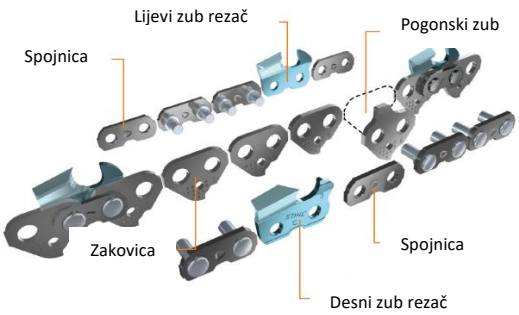
Lančanici motornih testera najčešće su napravljeni od visokokvalitetnog čelika kako bi izdržali visoke brzine i pritiske tokom rada (Slika 5.10). Površina lančanika često je ojačana toplotnom obradom ili premazana posebnim materijalima kako bi se povećala otpornost na habanje. Smatra se da je radni vijek lančanika jedna radnom vijeku 2-3 lanca (Halilović, 2017). Previše istrošen lančanik oštećuje pogonske članke lanca koji onda oštećuju vodilicu pa dolazi do stvaranja većih vibracija i pada produktivnosti (Majdak, 2015).



Slika 5.10. Lančanik motorne testere sa: a – zvijezdom, b – prstenom

Rezni mehanizam se sastoji od vodilice i lanca. Vodilica i lanac moraju odgovarati u smislu njihove veličine i dizajna.

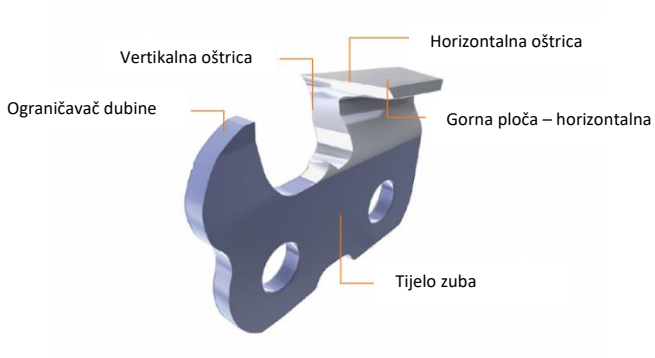
Lanac motorne testere je radni dio u užem smislu i može se reći da je to najvažniji dio motorne testere (Halilović, 2017). Motor i ostali dijelovi testere samo omogućavaju da lanac ostvario svoju ulogu (Bajc, 2005). Lanac čini niz zuba međusobno povezanim specijalnim spojnicama i zakovicama (Slika 5.11). Lanci mogu biti specijalni, namijenjeni za određene radne operacije (kresanje, ubodni rez) i univerzalni. Oštrica zuba je oblikovana tako da obavlja funkciju sječenja, odnosno zuba strugača i čistača. Zub za pogonjenje služi za vođenje lanca i za prenos snage s lančanika na lanac. Pogonske zube vodi vodilica. Oni klize po odgovarajućem žlijebu vodilice.



Slika 5.11. Dijelovi lanca motorne testere

Oštrica na sječivu na sječivu lanca ima jasno izražena tri dijela: horizontalni dio koji obrazuje dno proreza, vetikalni koji obrazuje zidove proreza i prelazni dio koji je posljedica oštrenja okuglim (valjkastim) turpijama i oblika sječiva.

Najvažniji dio lanca je zub za rezanje (rezač). On se sastoji od tijela zuba, gornje ploče, horizontalne oštrice, vertikalne oštrice i ograničavača dubine (Slika 5.12).



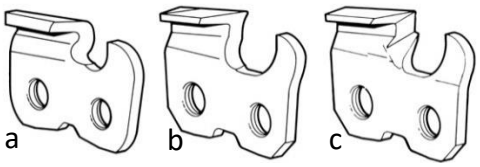
Slika 5.12. Dijelovi zuba za rezanje

Prema Halilloviću (2017) oštrica lanca može biti: sa okruglim zubima, poludjetlastim (polukvadratnim) zubima i sa dlijetastim (kvadratno-oštrobridnim zubima) (Slika 5.13).

Okrugli zub (eng. round chisel): Ovi zubi imaju okrugli profil s oštrim rubovima. Slični su semi-chisel zubima, ali s više zaobljenim profilom, što ih čini izdržljivijim i manje sklonim tupljenju.

Poludlijetasti zub (eng. semi-chisel): Ovaj oblik zuba ima zaobljene uglove na profilu. Semi-chisel zubi su manje osjetljivi na tupljenje i dobro rade u uslovima gdje je drvo prljavo ili sadrži pijesak. Takođe su nešto sporiji u rezanju u odnosu na chisel zube, ali omogućavaju duže vrijeme između oštrenja.

Dlijetasti zub (eng. chisel) ima kvadratni ili pravougaoni profil s oštrim uglovima. Chisel zubi su vrlo efikasni u rezanju i često se koriste za sječu tvrdog drveta. Imaju visoke performanse rezanja, ali su osjetljivi na tupljenje kada dođu u kontakt s prljavštinom ili pijeskom



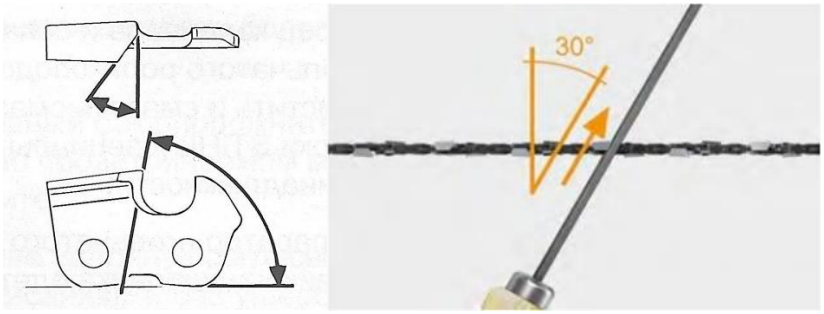
Slika 5.13. Tipovi zuba motorne testere: a – okrugli, b – poludlijetasti, c - dlijetasti

Pored prethodno nabrojanih postoje i zubi s niskim profilom (eng. low-profile). Ovaj oblik zuba ima niži profil od ostalih i često se koristi na lancima namijenjenim za manje motorne testere. Niski profil zuba pruža veću sigurnost i lakše rukovanje, pogodni su za hobi i povremene korisnike motornih testera.

Oblik i naoštrenost lanca imaju presudan uticaj na efikasnost rezanja. Prema Halilović (2017) najveće učinke imaju dlijetaste oštrice, za oko 15% veće od poludlijetastih.

S obzirom na položaj oštrica zuba za rezanje razlikuju se i uglovi oštrenja. U praksi se dosta grubo definiše ugao oštrenja, pri čemu se polazi od tog da on zavisi od položaja turpije, tj. od ugla koji zaklapa osa turpije sa pravcem kretanja lanca. U starijim prospektima se pod uglom

oštrenja uglavnom podrazumijevao ugao koji zaklapa turpija sa pravcem kretanja lanca. Danas se ugao oštrenja označava kao ugao koji zaklapa turpija sa pravom upravnom na smjer kretanja lanca. U drugom slučaju riječ je o dopunskom uglu do 90°u odnosu na prvi, pa iz tog proizilaze razlike u iskazivanju mjerenja. U prvom slučaju ugao oštrenja se kreće između 50° i 60°, a u drugom od 30° i 40° (Slika 5.14). U oba slučaja radi se o istom uglu. Navedeni dio se odnosi na vertikalni dio sječiva zuba. Ugao horizontalne oštrice zavisi od nadvišenja turpije prilikom oštrenja i od prečnika turpije. Optimalno nadvišenje iznosi 1/10 prečnika turpije (Nikolić, 1990; Halilović, 2017), dok neki proizvođači preporučuju 1/5 prečnika turpije (www.oregonproducts.eu). Pri oštrenju postoje četiti važna faktora, i to: ugao turpijanja, udarni ugao (ugao sječenja), položaj turpije i prečnik turpije.



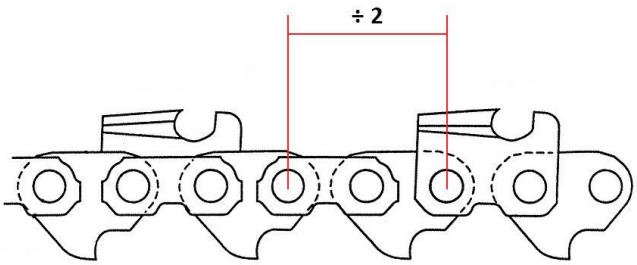
Slika 5.14. Uglovi oštrenja lanca motorne testere

Za oštrenje lanca se koriste i razna pomoćna sredstva - alati, kao što su šabloni za oštrenje koji obezbjeđuju da se lanci optimalno naoštre (Slika 5.15). Alati mogu biti ručni ili pogonjeni uz pomoć elektromotora.



Slika 5.15. Pomoćni alat za ošrenje lanca

Razlika između oštrice i graničnika dubine (visinsko nadvišenje) kreće se od 0,7 do 1,2 mm, što zavisi od tog koje drvo se reže. U slučaju četinara i mekih lišćara visinsko nadvišenje se ostavlja veće nego kod tvrdih lišćara (Dereta, 1986). Graničnik dubine se skida pljosnatom turpijom. Korak lanca označava veličinu zuba rezača i ostalih članaka lanca. Podjela ili korak lanca se dobije tako da se izmjeri razmak od jedne zakovice do treće po redu i dobijeni razmak podijeli sa dva (Slika 5.16). Obično se izražava u inčima, najčešći korak lanca na testerama koje se koriste u šumarstvu je 3/8 (9,92 mm).



Slika 5.16. Korak lanca motorne testere.

Pogonski članci lanca služe za vođenje lanca kao i za prenos snage sa lančanika na lanac. Klize po žlijebu vodilice i guraju ulje za podmazivanje reznog uređaja. Debljina pogonskog članka mora biti usklađena s širinom žlijeba vodilice. Dužina lanca zavisi od dužine vodilice. Veliki izazov kod konstrukcije lanca je svođenje vibracija koje nastaju pri rezanju na najmanji mogući nivo. Oregon je u saradnji sa Elektroluxom lansirao liniju lanaca sa smanjenim vibracijama pod nazivom Vibe-Ban, koji su dizajnirani tako da značajno smanjuju vibracije, čime se povećava udobnost i sigurnost prilikom korišćenja motorne testere. Specijalni dizajn Vibe-Ban lanaca smanjuje vibracije za 25% ili više na ručkama motorne testere, apsorbujući i raspršujući vibracije pre nego što stignu do ruku korisnika. Tehnologije LubriLink i LubriWell dodatno doprinose smanjenju vibracija. LubriLink veze između remenica pomažu ulju da ostane tamo gdje je najpotrebnije, dok LubriWell uljne rupe pomažu da se ulje ravnomjerno rasporedi po čitavoj dužini žlijeba na vodilici. Ove tehnologije produžuju životni vijek lanca i doprinose mirnijem radu, smanjujući vibracije (Warguła et al., 2020). Chamfer Chisel zubi rezači, sa specijalno oblikovanim uglovima, smanjuju agresivnost reza i time dodatno smanjuju vibracije. Ovaj dizajn pomaže i u smanjenju povratnog udarca (eng. kickback), čineći rad sigurnijim.

Vodilica (mač) je radni dio motorne testere po kojoj se kreće lanac. Svaka vodilica se sastoji od: žlijeba za pogonske članke lanca, prorez za osovinu kućišta testere, otvore za podmazivanje uljem i otvor za vijak za zatezač lanca. Izrađuje se od veoma kvalitetnog elastičnog čelika. Vodilica može biti konstruisana tako da je tačkasto zavarena od 3 čelična otpreska, ili je izrađena od jednog čeličnog komada sa žlijebom kroz koji prolaze vođice lanca i uz pomoć kojih se lanac drži zategnutim. Jedna strana vodilice je prilagođena za pričvršćivanje na kućište motorne testere, gdje se konektuje na dovod ulja za podmazivanje žlijeba vodilice. Podmazivanjem se smanjuje trenje reznog uređaja i odvodi toplota kako se rezni uređaj ne bi pregrijavao i prekomjerno habao (Dereta, 1986). Po obodu ima žlijeb po kome se kreću pogonski članci lanca.

Postoje dva osnovna tipa vodilica, sa zvijezdom na vrhu i bez zvijezde (Slika 5.17). Kod prvog tipa vodilica na prednjem kraju se nalazi posebna zvijezda (kotur) koju lanac zahvata i okreće, a ima svrhu da smanji trenje lanca i olakša savladavanje vršne krivine. Zvijezda ima valjkasti ležaj koji se podmazuje mašću, i sam vrh takve vodilice je kod nekih modela zamjenjiv. Mana ovakvih vodilica je to što ne mogu izdržati visoka naprezanja kao drugi tip vodilica, kao što kod ubodnog reza lakše dolazi po povratnog udara. Drugi tip vodilica umjesto zvijezde ima vrh ojačan specijalnim metalom otporniji na trošenje od ostalog dijela vodilice. Ove vodilice su

čvršće i uglavnom ih koriste profesionalci u srednjim i jakim sastojinama. Bez obzira na ojačanje habanje kod vodilica drugog tipa je veće nego kod vodilica prvog tipa ali im njihova robusnost i izdržljiost garantuje još dugo opstanak u praksi. Vodilice sa zvijezdom je potrebno podmazivati pri svakom dosipanju goriva, a to se radi posebnom mazalicom gdje se mast utiskuje u posebne utore dok ne probije na drugu stranu.

Šina vodilice je izložena raznim naprezanjima, toplotnom, habanju i savijanju. Neravnomjerno habanje ima za rezultat kosi rez i potrebu za češćom zamjenom. Da bi se omogućilo podjednako habanje potrebno je vodilicu povremeno, barem jednom tokom radnog dana ili nakon jednog potrošenog lanca okrenuti. Na zadnjem dijelu vodilice se nalaze otvori za priključak, otvori za prolaz klina napinjača i otvori za podmazivanje.

Vodilice se proizvode u različitim dužinama. Dužine reza se kreću od 30 do 90 cm, a najčešće su u dužinama od 40, 45 i 50 cm. Dužina vodilice treba da bude usklađena sa snagom motorne testere i sa dimenzijama drveta koje će se rezati. Iako postoje stadardi koji propisuju propisuju dužine vodilica u zavisnosti od zapremine motora testere (ISO 7505), najbolja preporuka je pridržavati se uputstva proizvođača konkretne motorne testere.



Slika 5.17. Vodilica Oregon sa zvijezdom na vrhu i s tvrdim vrhom

Uređaj za podmazivanje lanca motorne testere podmazuje lanac tokom rada, smanjujući trenje i habanje, te sprečava pregrijavanje. Sistem podmazivanja lanca obično se sastoji od nekoliko komponenti: rezervoara za ulje, pumpe za ulje, dovodnih cijevi i kanala, te regulatora protoka ulja. Testera ima dva rezervoara, rezervoar za gorivo i rezervoar za ulje. Da bi se spriječio „suvi" rad testere, rezervoar za ulje omogućava duže vrijeme rada od rezervoara za gorivo, odnosni zapremina rezervoara za gorivo je ograničena tako da se gorivo potroši prije ulja za podmazivanje, od stanja punog rezervoara. Pumpa za ulje je zadužena za dobod ulja iz rezervoara do lanca. Postoje različite vrste pumpi, uključujući mehaničke i automatske. Mehaničke pumpe se pokreću rotacijom pogonskog vratila, dok automatske pumpe rade bez potrebe za dodatnim podešavanjem korisnika. Pumpa ne radi dok je motorna testera u leru. Postoje različite vrste pumpi, ali motorna testera najčešće koristi klipne. Pored ovog načina podmazivanja postoje i uređaji koji vrše podmazivanje pomoću promjene pritiska u kućištu, gdje se promjena pritiska preko nepovratnog ventila usmjerava prema rezervoaru ulja, gdje se stvara visok pritisak koji onda dalje kroz otvore gura ulje prema vodilici (Halilović, 2017). Ulje se transportuje iz rezervoara do lanca preko sistema cijevi i kanala. Ovi kanali usmjeravaju ulje direktno na lanac i vodilicu. Neke motorne testere imaju regulator protoka ulja koji omogućava korisniku da prilagodi količinu ulja koja se isporučuje na lanac, u zavisnosti od uslova rada i potrebe za podmazivanjem.

Princip rada sistema za podmazivanje lanca motorne testere je jednostavan. Kada motorna testera radi, pumpa za ulje automatski povlači ulje iz rezervoara i prenosi ga kroz dovodne cijevi do lanca i vodilice. Ulje se nanosi na lanac dok se kreće duž vodilice, što smanjuje trenje između lanca i vodilice, sprečava pregrijavanje i habanje.

Pravilno funkcionisanje uređaja za podmazivanje lanca ključno je za dugotrajnost i efikasnost motorne testere. Treba redovno čistiti dovodne cijevi i kanale kako bi se spriječilo začepljenje koje može smanjiti efikasnost podmazivanja. Redovno održavanje i čišćenje sistema za podmazivanje osigurava optimalan rad motorne testere i produžava vijek trajanja lanca i vodilice.

Uređaj za zatezanje lanca kod motorne testere je ključna komponenta koja osigurava pravilnu napetost lanca, što je neophodno za sigurnu i efikasnu upotrebu testere. Pravilno zategnut lanac smanjuje rizik od isklizavanja ili pucanja lanca, čime se povećava sigurnost radnika i efikasnost. Jednostavne je konstrukcije. Glavna komponenta koja se koristi za zatezanje lanca je zavrtanj na kojem se nalazi zub koji ulazi u odgovarajući otvor na vodilici. Pomoću odvijača ili specijalnog alata, korisnik može okretati zatezni vijak kako bi podesio napetost lanca. U većini modernih modela motornih testera, zatezni vijak je smješten sa strane, što omogućava lakši pristup i jednostavnije podešavanje. Neki modeli imaju ugrađene vodiče ili oznake koje pomažu korisnicima da pravilno postave i zategnu lanac.

Moderni modeli motornih testera često dolaze sa sistemima za brzu zamjenu i zatezanje lanca koji omogućavaju podešavanje bez potrebe za dodatnim alatima. Ovi sistemi obično uključuju ručicu ili dugme koje korisnik može okrenuti ili povući kako bi lako zategnuo ili otpustio lanac. Neki modeli koriste opružni mehanizam za zatezanje lanca, koji automatski podešava napetost lanca kako bi se održala optimalna napetost tokom rada.

Pravilno zatezanje lanca zahtjeva nekoliko koraka. Prvo, uvijek treba isključiti motornu testeru i ostavite je da se ohladi prije podešavanja lanca. Zatim treba provjeriti napetost lanca. Lanac treba biti dovoljno napet da ne visi sa vodilice, ali i dovoljno labav da se može lako povući rukom. Pomoću zateznog zavrtnja ili sistema za brzu zamjenu podesiti lanac do željene napetosti. Nakon podešavanja treba ručno rotirati lanac da bi se provjerila glatkoća pokreta i pravilna napetost.

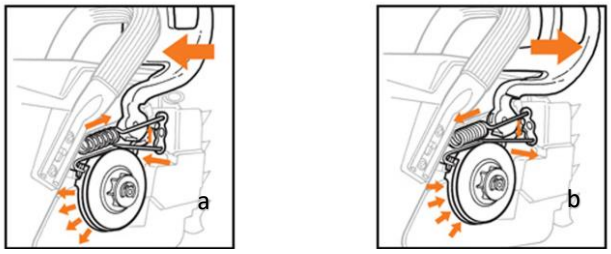
Nedovoljno zategnut lanac može dovesti do oštećenja pogonskih članaka i habanja lanca, a previse zategnut lanac dovodi prekomjernog trenja, zagrijavanja i habanja, i na kraju do pucanja lanca. U toku rada je potrebno s vremena na vrijeme provjeravati zategnust, a smatra se da je pravilno zategnut kada se sa gornje strane vodilice, na sredini dužine, može prstima odignuti za 1-1,5 cm kod vodilica s tvdim vrhom (bez vodilice), odnosno za oko 1,5 cm kod vodilica sa zvijezdom (Slika 5.18).



Slika 5.18. Zatezanje lanca motorne testere

Kočnica lanca motorne testere je sigurnosni mehanizam koji pomaže u sprečavanju povreda tokom rada motornom testerom. Njena osnovna funkcija je da brzo zaustavi lanac u slučaju povratnog udarca (eng. kickback) ili drugih opasnih situacija, čime se smanjuje rizik od ozbiljnih povreda. Prednja ručna kočnica je poluga smještena ispred prednje ručke motorne testere. Kada se dogodi povratni udarac, ruka korisnika prirodno udara u ovu polugu, koja je ujedno i štitnik za ruke, aktivirajući kočnicu lanca. Ova poluga je povezana s mehanizmom kočnice unutar kućišta motorne testere (Slika 5.19).

Većina modernih motornih testera ima inercioni mehanizam za aktivaciju kočnice. Ovaj mehanizam reaguje na nagle promjene u kretanju testere, kao što su one koje nastaju tokom povratnog udarca. Inercioni mehanizam može automatski aktivirati kočnicu bez potrebe za fizičkim kontaktom korisnika s prednjom ručnom kočnicom. Kada dođe do povratnog udarca, prednja ručna kočnica ili inercioni mehanizam aktiviraju traku kočnice. Traka se steže oko pogonskog zupčanika, brzo zaustavljajući lanac. Ovaj proces traje samo djelić sekunde, čime se značajno smanjuje rizik od povreda. Traka kočnice je dio mehanizma koji se zapravo steže oko pogonskog zupčanika lanca kada se kočnica aktivira. Lanac se zaustavi u vremenu 0,1-0,15 s, a potreban je sila od 30 do 70 N da bi se aktivirala (Jezdić, 2008).



Slika 5.19. Kočnica lanca motorne testere: a – aktivirana, b – deaktivirana (www.stihlusa.com)

Zbog osigurnanja višeg nivoa sigurnosti kod slučajnih nekontrolisanih pokreta ili povratnog udara postoji i kočnica lanca koja je vezana za desnu ruku, odnosno štitinik desne ruke. Aktiviranje ove kočnice se vrši pomjeranjem poluge smještene na zadnjoj ručki. Takođe, samim otpuštanjem poluge gasa, odnosno prestankom dotoka goriva aktivira se i kočnica lanca.

Jedan od najnaprednijih sigurnosnih sistema je TrioBrake, razvijen od strane Husqvarne. Ovaj sistem omogućava više načina aktivacije kočnice lanca, što smanjuje rizik od povreda. Sistem se sastoji od tri glavne komponente: prednjeg štitnika ruke, inercionog mehanizma i zadnjeg štitnika ruke. Prednji štitnik ruke funkcioniše slično kao kod standardnih motornih testera, gdje se pomjeranjem štitnika napred aktivira kočnica lanca. Ovaj štitnik može se aktivirati ručno ili automatski usljed povratnog udarca.

Inercioni mehanizam automatski aktivira kočnicu lanca u slučaju naglog povratnog udara. Ovaj mehanizam koristi princip inercije za brzo zaustavljanje lanca. TrioBrake sistem dodaje dodatnu mogućnost aktivacije kočnice putem zadnjeg štitnika ruke (Slika 5.20). Radnik može aktivirati kočnicu pomjeranjem zadnjeg štitnika unaprijed desnom rukom, što omogućava dodatni nivo sigurnosti, posebno u situacijama kada se mora brzo reagovati. Automatska aktivacija kočnice dešava se u slučaju povratnog udarca ili naglog pomjeranja motorne

testere, pri čemu inercioni mehanizam automatski aktivira kočnicu lanca. Prednji štitnik ruke takođe može automatski aktivirati kočnicu ako dođe do povratnog udarca. Korisnik može ručno aktivirati kočnicu pomjeranjem prednjeg ili zadnjeg štitnika ruke, što omogućava brz i jednostavan način za zaustavljanje lanca u slučaju potrebe.



Slika 5.20. Husqvarna TrioBrake kočioni sistem

Osloni nazub ili kandže kod motorne testere ima nekoliko funkcija. Glavna uloga je stabilizacija motorne testere, pružajući stabilnu tačku oslonca prilikom rezanja drveta. Postavljanjem nazuba na drvo, radnik može osigurati da motorna testera ostane stabilna i ne klizi tokom rada, što povećava preciznost i kontrolu.

Korišćenjem oslonog nazuba, radnik može kontrolisati dubinu i oblik reza. Pritisak na kandže omogućava precizno vođenje motorne testere kroz drvo, što pomaže u održavanju ravnomjernog i kontrolisanog reza. Kada su kandže postavljene na drvo, radnik može primjeniti dodatnu polugu, koristeći težinu motorne testere i svoju snagu. Ovo smanjuje napor potreban za rezanje, posebno kod tvrđih i debljih komada drveta. Dakle, osloni nazub pomaže u smanjenju zamora pružajući stabilnu tačku oslonca i omogućavajući korisniku da koristi masu motorne testere umjesto da koristi samo snagu ruku. Ovo je posebno korisno prilikom dugotrajnog rada. Kandže pomažu u sprečavanju povratnog udarca (eng. kickback) jer drže testeru stabilno na drvetu, što smanjuje rizik od iznenadnog povratka testere ka korisniku. Broj oslonih nazuba kod motorne testere može varirati zavisno od modela i proizvođača. Obično, motorne testere imaju jedan set oslonih nazuba koji se sastoji od nekoliko zubaca, obično između četiri i šest, smještenih na metalnoj ploči pričvršćenoj na prednjem dijelu testere, blizu lanca. Jače motorne testere mogu imati dva para nazuba.

Pored oslonog nazuba za ublažavanje udara i vibracija postoje i druge vrste ublaživača. Oni su smješteni između ručki i kućišta motora. Svaka savremena motorna testera ima ugrađen određen vid antivibracionog (AV) sistema. Različiti proizvođači su dosta poboljšali tehnologiju AV sistema. Motorne testere koriste gumene ili opružne amortizere koji se nalaze između ručki i tijela motorne testere. Ovi amortizeri apsorbuju vibracije koje dolaze od motora i lanca, sprečavajući da se te vibracije prenesu na ručke i dalje na ruke korisnika. Motori motornih testera su balansirani tako da smanje generisanje vibracija. Balansiranje motora uključuje precizno podešavanje pokretnih dijelova kako bi se smanjile nepoželjne oscilacije i vibracije. Povrh toga, ručke motornih testera su ergonomski dizajnirane da pružaju udoban i siguran hvat, čime se dodatno smanjuje osjećaj vibracija. Materijali koji se koriste za izradu ručki također igraju važnu ulogu u apsorpciji vibracija. Husqvarna Low Vib i Stihl Cellasto sistemi

protiv vibracija su dizajnirani da smanje prenesene vibracije sa motora i lanca motornih testera. Husqvarna Low Vib sistem koristi kombinaciju opruga i gumenih amortizera koji su postavljeni između motora i ručki motorne testere. Stihl Cellasto sistem koristi specijalne amortizere napravljene od materijala pod nazivom Cellasto, koji je kombinacija poliuretana i drugih elastičnih materijala. Ovi amortizeri su izuzetno otporni i efikasni u apsorpciji vibracija. Cellasto materijal pruža visoku otpornost na habanje i dugotrajnu stabilnost, što ga čini idealnim za korišćenje u sistemima protiv vibracija.

Ručke za držanje kod motorne testere igraju važnu ulogu u sigurnosti, udobnosti i kontroli prilikom rada. Dizajnirane su da budu ergonomske što je više moguće. Ergonomija ručki smanjuje zamor radnika tokom rada, omogućavajući bolju kontrolu nad testerom. Ručke su obično izrađene od materijala koji pružaju dobar grip i otpornost na habanje. Guma i plastika su najčešći materijali, jer omogućavaju čvrst i udoban hvat, čak i u vlažnim uslovima. Mnoge motorne testere imaju ugrađene sisteme za smanjenje vibracija (eng. anti-vibration system) unutar ručki. Ovi sistemi koriste gumene amortizere ili opruge kako bi apsorbovali vibracije koje dolaze od motora i lanca, smanjujući prenesene vibracije na ruke korisnika.

Motorne testere imaju dvije glavne ručke – prednju i zadnju. Prednja ručka omogućava vođenje i upravljanje testerom, dok zadnja ručka sadrži kontrole za gas i kočnicu lanca. Ovaj raspored omogućava optimalnu kontrolu i balans prilikom rada. Zadnja ručka obično sadrži kontrole za gas i kočnicu lanca. Neke motorne testere imaju dodatne kontrole integrisane u ručke za lakše upravljanje. Ručke su često izolovane kako bi se smanjila prenesena toplota sa motora na ruke korisnika. Ovo je posebno važno prilikom rada u dužim vremenskim periodima, jer smanjuje rizik od pregrejavanja ruku. U toku hladnih dana potrebno da ručke griju. Ručke motornih testera koje griju ruke radnika rade na principu električnog grijanja. Električni grijači su integrisani unutar ručki motorne testere. Ovi grijači su obično tanki i fleksibilni, tako da ne utiču na ergonomiju ili funkcionalnost ručki. Grijači su povezani sa električnim sistemom motorne testere, koji napaja grijače potrebnom električnom energijom. Grijanje ručki motornih testera uz pomoć izduvnih gasova koristi toplotu izduvnih gasova motora za zagrijavanje ručki, povećavajući udobnost radnika tokom rada u hladnim uslovima. Ovaj sistem je efikasan jer koristi već dostupnu toplotu iz motora, smanjujući potrebu za dodatnim izvorima energije. U sistemima grijanja ručki, dio izduvnog sistema je dizajniran da usmjerava dio toplote iz prigušivača prema ručkama motorne testere. Ovo se postiže korištenjem posebnih cijevi ili kanala koji prenose toplotu iz izduvnih gasova do ručki.

Hvatač lanca motorne testere je sigurnosni uređaj dizajniran da zaštiti korisnika u slučaju pucanja ili iskakanja lanca sa vodilice tokom rada. obično izrađen od metala ili jakog plastičnog materijala i postavljen je ispod pogonskog lančanika, blizu stražnje strane motorne testere. Kada lanac pukne ili iskoči sa vodilice, hvatač lanca sprečava da lanac nekontrolisano leti i potencijalno povrijedi radnika ili druge osobe u blizini. Hvatač lanca je obično postavljen tako da ne ometa normalan rad motorne testere, ali je dovoljno čvrst i izdržljiv da izdrži snagu i brzinu lanca u slučaju kvara. Ovaj uređaj je standardna sigurnosna komponenta na modernim motornim testerama.

Štitnici za ruke kod motornih testera predstavljaju sigurnosnu komponentu dizajniranu da zaštiti ruke radnika od povreda tokom rada. Prednji štitnik, smješten ispred prednje ručke,

služi kao barijera između ruku korisnika i lanca. Ovaj štitnik igra dvostruku ulogu: pruža fizičku zaštitu i služi kao aktivator kočnice lanca. U slučaju povratnog udarca (kickback), ruka korisnika može udariti u štitnik, što aktivira kočnicu lanca i momentalno zaustavlja lanac, smanjujući rizik od ozbiljnih povreda. Zadnji štitnik, smješten iza zadnje ručke, pruža dodatnu zaštitu za ruku koja drži gas. Ovaj štitnik štiti ruku od povreda koje mogu nastati uslijed kontakta s lancem ili drugim dijelovima motorne testere u slučaju kvara ili nesreće. Oba štitnika su izrađena od čvrstih, otpornih materijala koji mogu izdržati udarce i habanje.

Komandni uređaji za regulisanje rada motora motorne testere omogućavaju kontrolisanje brzine motora, osiguravajući efikasan i siguran rad. Ovi uređaji uključuju polugu gasa, čok, prekidač za paljenje, sigurnosni prekidač i druge kontrole. Poluga gasa je smještena na zadnjoj ručki i omogućava korisniku da kontroliše brzinu motora. Pritiskom na polugu gasa, korisnik povećava protok goriva u motor, čime se povećava broj obrtaja i snaga. Kada se poluga gasa otpusti, motor se vraća na niske obrtaje ili na rad u praznom hodu. Poluga gasa ima i sigurnosni mehanizam koja sprečava slučajno pritiskanje.

Čok je uređaj koji pomaže pri pokretanju hladnog motora. Kada se motorna testera ne koristi duže vrijeme ili kada je temperatura niska, čok povećava smjesu goriva i zraka, olakšavajući paljenje motora. Čok se obično nalazi blizu karburatora i može se ručno povući ili gurnuti, zavisno o dizajnu motorne testere.

Prekidač za paljenje je smješten na lako dostupnom mjestu, obično na zadnjoj ručki, prekidač za paljenje omogućava korisniku da brzo isključi motor. Ovaj prekidač je bitan za hitne situacije kada je potrebno brzo zaustaviti motor zbog sigurnosnih razloga.

Osim ovih osnovnih uređaja, mnoge moderne motorne testere imaju dodatne kontrole koje olakšavaju rad i povećavaju sigurnost. To uključuje regulatore protoka ulja za podmazivanje lanca, koji omogućavaju korisniku da prilagodi količinu ulja koja se isporučuje na lanac u zavisnosti od uslova rada. Takođe, neki modeli imaju digitalne ekrane ili indikatorne lampe koje prikazuju informacije o stanju, kao što su nizak nivo ulja ili problemi sa paljenjem.

Sigurnosni prekidač ili prekidač za zaustavljanje u nuždi također je važna komponenta. Ovaj uređaj omogućava korisniku da brzo zaustavi motor u slučaju nužde. Obično se nalazi na lako dostupnom mjestu, često blizu palca ili prsta korisnika, tako da se može brzo aktivirati.

5.1.4. Električne motorne testere

Proizvođači alata su postepeno prebacili većinu svog asortimana na baterijski pogon. Promjena je započela još 1969. godine, kada je proizvedena prva bušilica na baterije. Od tada su proizvođači prešli na baterije, povećali napone i dodali mogućnosti brzog punjenja (Pistoia, 2009). Od tada, baterijski pogon je počeo dominirati u segmentima alata, s izuzetkom alata koji se koristi vani. Razlog za takvu tranziciju su poboljšane performansa baterijskih alata, što znači manje održavanja, nema zagađenja vazduha na licu mjesta i nema kablova (Kiehne, 2003).

U posljednjih 50 godina, započet je veliki pomak ka baterijskim vanjskim primjenama, s baterijskim kosilicama i trimerima. Posljednji alati koji su se počeli koristiti na baterije su

duvači vazduha i motorne testere. Razlozi za to su vrlo teški radni uslovi i visoki zahtjevi za snagom. Razvoj alata na baterije je otežan kapacitetom skladištenja energije u baterijama. Baterije su sposobne skladištiti relativno malu količinu energije u poređenju s njihovom masom (Delucchi i Lipman, 2001).

Električne motorne testere na baterije ne emituju štetne izduvne gasove jer je umjesto dvotaktnog benzinskog motora u takve testere ugrađen DC (eng. Direct Current) motor bez četkica, koji smanjuje nivo buke i vibracija. Upotreba motornih testera na baterije, u poređenju sa benzinskim, može smanjiti dnevnu izloženost vibracijama za više od 51% i nivo buke za 11% (Pandur et al., 2023). Zbog ovih prednosti, motorne testere na baterije treba da budu upotrebljavane u svim neprofesionalnim i profesionalnim poslovima, kada je to moguće. Najveći problem motornih testera na baterije je nedovoljan kapacitet i pregrijavanje baterija usljed intenzivnog rada, što zahtijeva upotrebu više baterija za normalan rad, a samim tim i manju produktivnost. Najnovija istraživanja su dokazala da ne postoji značajna razlika u produktivnosti između akumulatorske i benzinske motorne testere jednake snage u realnim uslovima. Zbog manje snage, niže efikasnosti i manje brzine rotacije lanca motornih testera na baterije, njihova upotreba je mogla biti održiva samo u plantažnim šumama zbog manjih i homogenijih dimenzija stabala.

Na efikasnost rezanja i potrošnju energije motornih testera utiču tip lanca, zategnutost lanca, gustoća drveta, odnosno vrsta drveća, sadržaj vlage, a najviše oštrina lanca. Dokazano je da su za veće gustoće drveta veći zahtjevi za jačom silom rezanja. Posljednjih godina vodeći proizvođači električnih alata konstantno poboljšavaju performanse motornih testera na baterije, a danas su, zahvaljujući unapređenju tehnologija električnih instrumenata, deklarisane vrijednosti snage motornih testera na baterije uporedive sa njihovim lakim benzinskim pandanima. Takođe, performanse modernih Li-Ion (litijum-jonskih) baterija, veća izlazna struja, produžen vijek trajanja baterije i poboljšani DC motori bez četkica u kombinaciji sa sistemom za upravljanje baterijama (BMS – Battery Management Systems) mogu omogućiti efektivno radno vrijeme od više od 50 minuta sa jednim punjenjem. Manje održavanja, odsustvo štetnih izduvnih gasova, odsustvo kablova, manje opterećenje (nivo buke, vibracije) i veliki izlazni obrtni moment pri malim brzinama motora su još neke prednosti testera na baterije.

Neki od glavnih nedostataka testera na baterije su visoka cijena i velika težina baterija, dok u isto vrijeme baterija i dalje ima izuzetno nisku gustinu energije u poređenju sa benzinom. Za profesionalne korisnike u šumarstvu, 8–10 paketa baterija mogu biti dovoljni za cijeli radni dan, ali su ukupne težine oko 20 kg i zahtijevaju značajna početna ulaganja (cijena jednog paketa baterija je oko 500 evra). Mogućnost punjenja baterija na radilištu je trenutno najveće ograničenje za upotrebu testera na baterije. Takođe je važno napomenuti dostupnost resursa za proizvodnju litijum-jonskih ćelija koje mogu usporiti razvoj baterijskih sistema u poređenju sa tradicionalnim benzinskim. Za profesionalnu upotrebu u šumarstvu, Pandur et al. (2023) preporučuju korišćenje električne testere Stihl MSA 300 sa baterijom Stihl AP 500S u ekološkom/srednjem režimu rada, jer ova motorna testera postiže najbolje rezultate u pogledu potrošnje energije i efikasnosti rezanja (Slika 5.21) (Tabela 5.5). Za male radove, kao što su selektivno čišćenje mladih šumskih sastojina ili rezidba za rad u urbanim sredinama,

manje motorne testere (Stihl MSA 200 i Stihl MSA 220) su veoma pogodne zbog svojih laganih i zadovoljavajućih performansi rezanja.

Tabela 5.5. Karakteristke električnih testera (Pandur et al., 2023)

Tip testere	Masa[1]	Izlazna snaga[2]	Dužina vodilice	Vrsta lanca	Brzina lanca
Stihl MSA200	2,9 kg	1,1 KW	30 cm	1/4“ PM3	19 m/s
Stihl MSA220	3,6 kg	2 KW	40 cm	3/8“ PS3	24 m/s
Stihl MSA300	4,5 kg	3,3 KW	45 cm	0,325“ RS Pro	20;24;30 m/s
Tip baterije	Masa	Nominalna voltaža	Kapacitet (Ah)	Kapacitet (Wh)	Li-Ion Technology
Stihl AP300S	1,8 kg	36 V	7.2 Ah	281 Wh	
Stihl AP500S	2 kg	36 V	8.8 Ah	337 Wh	

[1]bez baterije, vodilice, lanca i ulja; [2]mjereno tokom testa;



Slika 5.21. Električna motorna testera STIHL MSA 300 i baterija AP300s (https://www.stihl.co.uk)

Električne motorne testere postižu dobre rezultate u apsolutnom smislu, a u nekim slučajevima su produktivnije od referentnog modela s motorom s unutrašnjim sagorijevanjem. Električni motori, zahvaljujući kružnom kretanju rotora, ne razvijaju unutrašnje naizmjenične pokrete, što značajno smanjuje vibracije, kao i buku, koja je znatno niža u poređenju sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem (Colantoni et al., 2016).

Električne motorne testere su dobra alternativa benzinskim testerama za upotrebu u šumarstvu malih razmjera, jer je efikasnost rada uporediva s benzinskim testerama, a pružaju niži nivo potrošnje energije i manju izloženost sjekača buci i vibracijama. Slično kao i u drugim oblastima, rezultati su potvrdili pozitivan uticaj elektrifikacije alata na čovjeka i okolinu. Očekuje se da će se razvoj električnih alata za šumarstvo intenzivirati s razvojem snažnijih baterija, koje se trenutno smatraju glavnom preprekom.

5.2. Šumski čistač

Često je potrebno izvršiti sječu neželjenog rastinja koje ometa rast i razvoj drveća, šumsko-uzgojne radove, kretanje, gradnju šumskih objekata ili postoji bilo koji drugi razlog za uklanjanje. Nadzemni dijelovi drvenaste vegetacije mogu se odsijecati ručnim alatom (mačete, ručne testere) ili motorno-manuelnim mašinama (motorne testere, šumski čistači). Rada ručnim alatom je težak i neefikasan posao koji je zahtijevao značajan utrošak energije radnika (Grzywiński, 2009). Motorne testere koje se koriste u tu svrhu su lake konstrukcije i nižih performansi, snage motora 1,1-2,6 KW.

U zadnje vrijeme se mnogo češće od motornih testera u ovi svrhu koriste motorni šumski čistači. Oni su najčešće korišćen alat za njegovanje mladih sastojina (Naskrent et al., 2020).To su prenosive mašine koje se koriste za više namjena kao što su košenje zeljaste vegetacije, uklanjanje nepoželjnog podmlatka, kako zeljaste tako i drvenaste prirode i sječa tanjeg drveća. Šumski čistači se obično koriste u operacijama sječe u brzorastući plantažama kada se radi o malim parcelama ili kada se brzorastuće plantaže podižu u svrhu ekološkog inženjeringa (Guidi et al. 2013). Šumski čistači i trimeri su slični alati, ali postoje određene razlike između njih koje se odnose na njihovu namjenu, konstrukciju i snagu. Šumski čistači su dizajnirani za teže poslove i mogu se koristiti za rezanje gustih šikara, malih stabala, tvrdih korova i grmlja. Idealni su za rad u šumama, na poljoprivrednim površinama i za zahtjevnije zadatke čišćenja vegetacije. Šumski čistači su obično snažniji od trimera. Imaju jače motore, često dvotaktne ili četverotaktne benzinske. Trimeri su dizajnirani za lakše poslove kao što su rezanje trave, tanjeg korova i manjih grmova. Često se koriste u vrtovima, dvorištima, parkovima i za rad oko rubova travnjaka. Trimeri su obično manje snažni od šumskih čistača. Često koriste električne motore ili baterijski napajane sisteme, mada su uglavnom s benzinskim motorima.

Šumski čistači se sastoje od tri glavne konstrukcione grupe: motora, prenosnika i radnih alata. Pogoni se uglavnom dvotaktnim benzinskim jednocilindričnim motorom, hlađenim vazduhom, sa membranskim karburatorom koji omogućava rad u svim pozicijama. Dvotaktni motori su popularni zbog svoje jednostavne konstrukcije, male težine i sposobnosti da isporučuju visoku snagu u odnosu na svoju veličinu. Međutim, postoje i modeli sa četverotaktnim jednocilindričnim motorima, koji imaju veću efikasnost, odnosno manju potrošnju goriva i emisiju gasova. U posljednje vrijeme, sve više šumskih čistača koristi električni pogon i pogon na baterije, pružajući tiši rad i smanjenje štetnih emisija, što ih čini pogodnim za upotrebu u urbanim sredinama i područjima osjetljivim na buku (Chi, 2012). Integracija tehnologije elektronske kontrole snage u tradicionalne mehaničke mehanizme tipičnih motora sa unutrašnjim sagorevanjem omogućila je dizajn i implementaciju nove električne motorne kose sa kontrolom brzine rotacije sječiva i funkcijama zaštite elektronskih kola.

Radni dio ovih uređaja se nalazi na jednom kraju metalne cijevi (vratila), dok je drugi kraj cijevi vezan za motor s odgovarajućim ručkama za držanje i komandnim polugama (Wójcik, 2015). Dio ove grupe je i rezervoar za gorivo i uređaj za pokretanje. Motor je spojen s vratilom za prenos snage pomoću centrifugalnog kvačila, koje osigurava da se radni alat ne pokreće dok motor radi u praznom hodu, čime se povećava sigurnost korisnika.

Vratilo za prenos snage se nalazi u metalnoj zaštitnoj cijevi koja pruža dodatnu sigurnost i zaštitu od oštećenja. Profesionalni šumski čistači imaju ravno vratilo koje pruža veću snagu i izdržljivost, idealno za teže zadatke kao što su čišćenje guste vegetacije, rezanje malih stabala i grmlja. Imaju masu oko 8–9 kg sa dodatnom opremom, a njihova snaga je oko 2 kW (Uusitalo i Pearson, 2010). S druge strane, pojedini modeli namijenjeni za hobi korisnike često koriste zakrivljeno vratilo, koje je lakše za rukovanje i pogodnije za manje zahtjevne zadatke kao što je uklanjanje zeljastih biljaka i održavanje dvorišta.

Radni alati šumskih čistača uključuju različite vrste noževa, diskova i glava sa najlonskim nitima. Noževi i diskovi su dizajnirani za rezanje guste i tvrde vegetacije, dok su glave sa

najlonskim nitima idealne za trave i mekše korove. Profesionalni modeli često dolaze s više opcija za radne alate, omogućavajući korisnicima da prilagode čistač specifičnim potrebama.

Električni šumski čistači na baterije postaju sve popularniji zbog ekoloških prednosti i smanjene buke. Opremljeni su snažnim litijum-jonskim baterijama koje omogućavaju duži rad bez potrebe za čestim punjenjem. Iako još uvijek zaostaju za benzinskim modelima u pogledu ukupne snage i trajanja rada, napredak u tehnologiji baterija brzo smanjuje ovaj jaz. Električni modeli su također lakši i jednostavniji za održavanje, bez potrebe za gorivom i uljem, što ih čini atraktivnim izborom za kućne korisnike i profesionalce koji rade u urbanim sredinama.

Šumski čistači koriste različite vrste reznih alata, uključujući metalne noževe, diskove i testere koje mogu rezati deblje grane i stabljike, dok trimeri najčešće koriste plastične linije (strune) ili manje noževe.

Šumski čistač se koristi tako što ga radnik nosi okačenog s jedne strane tijela uz pomoć specijalnih traka (remenja). Usmjerava se pomoću ručki koje su pričvršćene na cijev. Trake za nošenje moraju biti podešene tako da cijev sa kardanom doseže oko 150 mm ispod zgloba kuka operatera, dok lakat treba da napravi ugao od 120-130° tokom kretanja. Noviji tipovi čistača imaju podesive ručke s osnovnim kontrolama, uključujući polugu gasa i prekidač za start.

Kod nekih modela motorni dio je spojen sa zaštitnom cijevi preko fleksibilne osovine, pri čemu se motor nosi na leđima operatera, a vratilo se drži za ručke. Ova konstrukcija omogućava bolju raspodjelu težine i smanjuje napor operatera tokom rada. Radna brzina reznih alata iznosi 8000-9000 obrtaja u minuti, što osigurava efikasno i brzo uklanjanje vegetacije.

Korišćenje šumskog čistača zahtijeva pravilno podešavanje i rukovanje kako bi se postigla maksimalna efikasnost i sigurnost. Pravilno podešavanje traka i ručki ključno je za udobnost operatera i smanjenje umora tokom dužih radnih perioda (Slike 5.22 i 5.23).





Slika 5.22. Rad šumskim čistačem (www.husqvarna.com) Slika 5.23. Stihl FS 460 C-EM K (www.stihl.com)

Tabela 5.6. Tehničke specifikacije šumskog čistača Stihl FS 460 C-EM K (www.stihl.com)

Zapremina motora	45,6 cm^3
Izlazna snaga	2,2 kW
Masa (bez goriva, reznog alata i štitnika)	8,4 kg
Nivo zvučnog pritiska K-faktor prema Dir 2006/42 / EC = 2,5 dB (A)	101 dB
Nivo jačine zvuka s metalnim alatom K-faktor prema Dir 2006/42 / EC = 2,5 dB (A)	113 dB
Nivo vibracije, lijevo/desno, s metalnim alatom K-faktor prema Dir 2006/42 / EC = 2 m/s^2	2,4/2 m/s^2
Ukupna dužina bez reznog alata	168 cm
Rezni alat	Kružna testera 200-22

Šumski čistači su opremljeni različitim tipovima radnih alata kako bi se prilagodili specifičnim potrebama i vrstama vegetacije koju treba ukloniti. Najčešći tipovi su (Slika 5.24):

- Trimer glava s silkom: Najčešće se koristi za tanku travu i lakšu vegetaciju. Trimer glave koriste zamjenjive niti koje se vrte velikom brzinom.
- Noževi: Koriste se za gustu travu, korov, i manje grmlje. Noževi mogu biti različitih oblika i veličina, zavisno od potrebe. Izrađeni su od čvrstog metala i mogu imati dvije ili više oštrica.
- Kružne testere: Koriste se za rezanje debljih grana, šiblja, pa čak i mladih stabala.



a b c

Slika 5.24. Rezni alat: a) - s silkom b) - nož za travu i manje grmlje; c) - kružna testera (www.stihl.com)

U šumskim radovima najčešće se koriste kružne testere na šumskim čistačima. Postoje dva osnovna tipa zuba: čisel zubi (eng. chisel) sa ili bez ograničavača dubine, i zubi grebači (Slika 5.25). Testere sa grebačima obično imaju do 80 zuba duž obima i karakterišu ih niža brzina rezanja i veći kvalitet reza. Ove testere su posebno korisne za parkove i vrtove, ali ih je nemoguće naoštriti direktno na terenu. U novije vrijeme, testere sa čisel zubima postaju popularnije. Ovi zubi su slični zubima na lancu motorne testere, što im pruža određene pogodnosti, kao što su gladak rez i manje oštećenje kore pri ulasku u drvo. To ih čini pogodnim za orezivanje, naročito onih vrsta koje imaju glatku i osjetljivu koru, poput vrbe.

Pri korišćenju ovih testera za obaranje drveta, mora se uzeti u obzir potreban prečnik testere. Za obaranje mladog stabla prečnika oko 30 mm, preporučuje se testera prečnika 200 mm. Za veće prečnike stabala potrebne su testere prečnika većeg od 225 mm, kao i čistači s motorima radne zapremine preko 35 cm^3. Ove profesionalne linije šumskih čistača dostupne su kod svih značajnijih proizvođača.



a b

Slika 5.25. Kružna testera: a) čisel zubi, b) grebači (www.stihl.com)

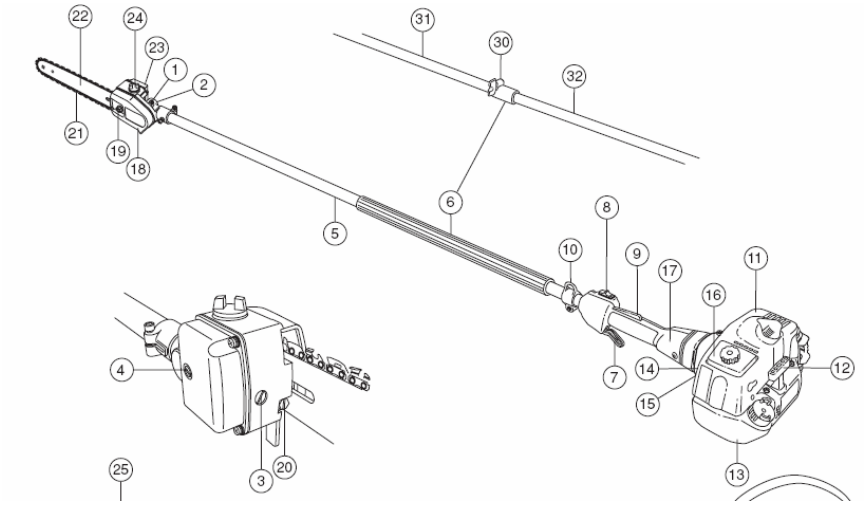
Neki od najpoznatijih proizvođača šumskih čistača su: STIHL, Husqvarna, Echo, Honda, Makita, i Jonsered. Takođe, kao i kod većine drugih alata postoje i mnogobrojni kineski proizvođači koje se sve više probijaju na evropsko tržište.

5.3. Mašine za orezivanje i kresanje grana

Mašine za orezivanje i kresanje se koriste kako bi olakšale i ubrzale proces uklanjanja grana s dubećeg ili oborenog stabla, poboljšavajući zdravlje i estetiku drveća ili pripremajući drvo za transport ili daljnju obradu. Njihova upotreba smanjuje potrebu za ručnim radom, čime se povećava efikasnost i sigurnost radnika. Kresanje stabala, odnosno odsjecanje grana obavlja se po obaranju stabla. Rjeđe se krešu dubeća stabla u cilju njege, koja se sastoji u odsjecanju grana sa donjih dijelova stabla (Nikolić, 1990).

5.3.1. Mašine za orezivanje

Mašina za orezivanje ili motorna testera za orezivane je alat dizajniran za odcijecanje grana drveća i manjih biljaka. Ovaj alat je kompaktan i lagan, što ga čini idealnim za precizne rezove na teško dostupnim mjestima. Obično imaju manje motore i kraće lance u poređenju s klasičnim motornim testerama, što doprinosi njihovoj upravljivosti i lakšoj kontroli. Dolaze s teleskopskim ručkama koje omogućavaju obrezivanje viših grana bez potrebe za ljestvama. Električni modeli su popularni zbog svoje male buke i ekološke prihvatljivosti, dok su benzinski modeli prilagođeni za teže poslove. U šumarstvu koriste na različitim mjestima i za različite zadatke. Uglavnom se koriste u sljedećim situacijama: održavanje puteva i staza, priprema terena za sječu, održavanje mladih sastojina i zasada, sanacija šteta i priprema terena za pošumljavanje. Orezivanje poboljšava čvrstoću drveta kao građevinskog materijala, smanjuje promjene oblika poput uvijanja i podstiče proizvodnju drveta visokog kvaliteta bez čvorova. Kombinacija orezivanja i proređivanja drveća poboljšava osvetljenost i podstiče zdrav rast. Tokom orezivanja česti su zastoji zbog uklještenja vodilice, zbog uvijanja između grana (Ishigure et al., 2010). Koriste se prvenstveno ručni motorni orezivači sa cijevnim nosačem na čijem se kraju nalazi vodilica sa lancem i rezervoar za ulje za podmazivanje lanca (Slike 5.26 i 5.27). Ovi orezivači su praktični za rad na visini, omogućavajući operaterima da dosegnu visoke grane bez potrebe za penjanjem po drveću. Motorni orezivači su opremljeni benzinskim ili elektro motorima koji pokreću lanac, omogućavajući brzo i efikasno rezanje grana različitih debljina.



1	Poklopac mazalice	8	Prekidač za zaustavljanje motora	15	Izlaz za vazduh
2	Konusni zupčanik	9	Zaglavljivač ručice gasa	16	Poklopac prečistača za vazduh
3	Vijak za podešavanje količine ulja za podmazivanje lanca	10	Osigurač ručice gasa koji mora biti pritisnut u toku rada	17	Poklopac spojnice
4	Vijak za osiguranje vijka (3)	11	Oplata motora	18	Poklopac pogonske zvijezde
5	Vratilo	12	Potezač startera	19	Vijak za učvršćivanje vodilice
6	Prednja ručka	13	Rezervaoar goriva	20	Vijak za zatezanje lanca
7	Ručica gasa	14	Čok –saug	21	Lanac
				22	Vodilica
				23	Rezervoar za ulje za lanac

Slika 5.26. Dijelovi orezivača grana



Slika 5.27. Stihl HT250 orezivač grana (www.stihl.com)

Tabela 5.7. Tehničke specifikacije STIHL HT 250i STIHL HTA 135 (www.stihl.com)

Model	STIHL HT 250	STIHL HTA 135
Tip motora	Dvotaktni motor	Električni motor (baterijski)
Snaga motora	1.5 kW / 2.0 KS	Ekvivalentno 1.4 kW
Radna zapremina motora	40.2 cm^3	N/A
Dužina vodilice	30 cm (12 inča)	30 cm (12 inča)
Tip lanca	STIHL Oilomatic, 1/4" PM3	STIHL Oilomatic, 1/4" PM3
Zapremina rezervoara goriva	530 ml	N/A
Zapremina rezervoara za ulje	220 ml	105 ml
Težina	6.6 kg (bez rezne opreme)	5.1 kg (bez baterije i rezne opreme)
Ukupna dužina	270 cm (s produžetkom do 390 cm)	285 cm (s produžetkom do 405 cm)
Sistem za podmazivanje lanca	Automatski sistem za podmazivanje lanca	Automatski sistem za podmazivanje lanca
Antivibracijski sistem	Da, integrisan	Da, integrisan
Funkcija za lakše pokretanje	STIHL ElastoStart	N/A (električno pokretanje)
Potezna starter ručica	Da	N/A

Tip drške	Ergonomska, gumirana drška za udobno rukovanje	Ergonomska, gumirana drška za udobno rukovanje
Namjena	Profesionalna upotreba za orezivanje visokih grana	Profesionalna upotreba za orezivanje visokih grana

Ishigure et al. (2013) su konstruisali robota za orezivanje, koji koristi vlastitu masu i pogon motorne testere. Robot se sastoji od mehanizma za penjanje gore-dole, mehanizma motorne testere i kontrolera. Mehanizam za penjanje ima četiri aktivna točka sa sistemom za upravljanje i mehanizmom za podešavanje položaja sa dva stepena slobode, koji održava horizontalni položaj robota. Robot može ostati na stablu bez trošenja energije koristeći vlastitu masu. Mehanizam motorne testere uključuje motornu testeru i mehanizam za podešavanje položaja sa dva stepena slobode, koji održava određenu udaljenost i položaj u odnosu na površinu stabla.

5.3.2. Mašine za kresanje grana

Mašine za kresanje grana koriste se prvenstveno za kreanje grana oborenih stabala, a rjeđe i za dubeća stabla. U praksi se često koriste motorne testere za ovaj posao, ali to je težak posao i nastoji se kad je moguće da se mehanizuje.

Za kresanje grana dubećih stabala konstruisane su i mašine koje se spiralno penju uz stablo i krešu grane. Mašine za kresanje koje su namijenjene za orezivanje dubećih stabala uz kretanje uz deblo omogućavaju efikasno kresanje grana bez potrebe za ručnim radom, čime se značajno povećava produktivnost. Jedna od najistaknutijih mašina u ovoj kategoriji je Advaligno PATAS. To je mašina za kresanje i orezivanje drveća, dizajnirana da efikasno i sigurno obavlja ove zadatke u šumskim plantažama. Ona zamjenjuje tradicionalne, teške uređaje za kresanje i omogućava rad sa minimalnim oštećenjem kore drveća.

Ova mašina koristi tehnologiju koja kombinuje hidrauličke i pneumatske sisteme za rezanje grana dok se kreće uz deblo stabla. Zahvaljujući reznim noževima i gumiranim trakama koje pružaju stabilnost, Advaligno PATAS može da oreže grane bez oštećenja kore stabla (Slika 5.28).

Može da oreže između 50 i 100 stabala na sat, dostižući visine od 12 do 15 metara. Procjenjuje se da mašina može da oreže drvo visine 12 metara za 8 do 10 sekundi. Jednostavno rukovanje ovom mašinom je omogućeno zahvaljujući njenoj kompaktnoj težini od oko 50 kg i daljinskom upravljaču koji omogućava lakše manevrisanje. Mašina zahtjeva dva radnika za upravljanje i transport, a pneumatski ventili omogućavaju podešavanje pritiska reznih noževa. Opremljena je daljinskim upravljačem, i omogućava operateru potpunu kontrolu nad procesom, omogućavajući mu da se lako prilagodi različitim vrstama drveća i uslovima terena.



Slika 5.28. Advaligno PATAS mašina za kresanje (www.advaligno.com)

Savremene višenamjenske mobilne mašine za obaranje, kresanje i prerezivanje stabala imaju specijalno konstruisan zahvatni uređaj opremljen noževima ili lancem za kresanje grana.

Relativno kretanje se obavlja na dva načina:

- Pomjera se stablo,
- Noževi se kreću duž stabla (potezni uređaji).

Pored mobilnih, postoje i stacionarne mašine koje su opremljene uređajem za uvođenje stabla u glavu za kresanje u obliku hidrauličke ruke. Stroke boom delimber predstavlja dodatak montiran na osnovnu mašinu, sposoban za uklanjanje grana i isjecanje stabala.

Stroke boom (potezni) kresač grana se sastoji od ruke sa hvataljkom (koja se ovdje naziva "prednja" hvataljka) i testere montirane na njoj. Druga hvataljka (nazvana "zadnja" hvataljka) i testera montirane su na osnovnoj mašini. Ruka je postavljena horizontalno na mašinu i može se nagnuti i produžiti kako bi pokupila stablo s prednjom hvataljkom. Stablo se obično hvata negdje blizu sredine. Donji dio stabla se postavlja u zadnju hvataljku. Hvataljke funkcionišu kao noževi za uklanjanje grana, slično kao noževi na glavi procesora. Ruka gura prednju hvataljku duž stabla kako bi uklonila grane dok zadnja hvataljka drži stablo u položaju. Stablo se skraćuje i siječe na dužine trupaca pomoću testere na grani. Zadnja pila se često koristi za obrezivanje donjeg dijela stable.

Postoje dvije vrste ruku: jednostruke i teleskopske. Jednostuke su jednodjelne koje ne mijenjaju dužinu. Cijela ruka klizi naprijed-nazad tokom rada, što znači da mora postojati prostor iza mašine. S druge strane, teleskopske grane obično imaju fiksni dio montiran na nosač s teleskopskim dijelom koji se produžava ispred fiksnog dijela.

Stroke boom kresači grana se obično koriste u sklopu sistema za sječu cijelih stabala kao što je feler banker/skider (eng. feller buncher/skidder) system. Uglavom se kombinuje sa grapl skiderima (Hiesl, 2015) Ovaj sistem isporučuje cijela stabla na stovarište mjesto gdje kresač može raditi na fiksnoj poziciji. Nije sposoban za utovar debala u kamion.

Mogu biti i višefunkcionalne mašine kao što je John Deere D-Series Knuckleboom utovarivača/kresača 335D i 437D (Tabela 5.8). Dakle to su mašine koje vrše i funkciju kresana i utovar okresanih debala. Model 437D ima hidraulične opcije za napajanje dodatne opreme kao što su kružne testere ili samohodne prikolice (Slika 5.29).



Slika 5.29. John Deer 437D Knuckleboom utovariva/kresač grana (www.deere.com)

Tabela 5.8. Tehničke karakteritike John Deer 335D i 437D Knucleboom utovarivača/kresača

Specifikacija	335D	437D
Motor	John Deere 6068T PowerTech™ E 6.8L	John Deere 6068T PowerTech™ E 6.8L
Snaga	129 kW (173 hp)	129 kW (173 hp)
Domet grane	9144 mm (30 ft. 0 in.)	9754 mm (32 ft. 0 in.)
Težina u radu	12 510 kg (27,580 lb.)	14 959 kg (32,980 lb.)
Kapacitet dizanja na 10 ft.	8732 kg (19,251 lb.)	12 252 kg (27,046 lb.)
Zakretni moment	41 600 Nm (30,683 lb.-ft.)	48 809 Nm (36,000 lb.-ft.)
Kapacitet rezervoara za gorivo	340 L (90 gal.)	340 L (90 gal.)
Sistem hidraulike	Triple-gear pump assembly	Tandem variable-displacement, axial-piston
Nivo emisije	EPA Tier 2	EPA Tier 2
Broj cilindara	6	6
Zapremina motora	6.8 L (415 cu. in.)	6.8 L (415 cu. in.)
Raspon stabilizatora	5309 mm (17 ft. 5 in.)	5309 mm (17 ft. 5 in.)
Visina mašine	4112 mm (13 ft. 6 in.)	4112 mm (13 ft. 6 in.)
Zakretna brzina	8.43 rpm	10.6 rpm
Kapacitet podizanja (različiti dometi)	4579 kg (10,095 lb.) na 6.1 m (20 ft.)	12 252 kg (27,046 lb.) na 3.05 m (10 f

Postoje i kresači grana manjih gabarita koji su višefunkcionalni. Jedan takav je U KESLA 40LFe koji se može instalirati na A-frame stabilizatore KESLA 200-serije utovarivača, na KESLA šumsku prikolicu ili na standardni podizač na traktoru gdje se vješa u tri tačke (Slika 5.30). Kod KESLA 40LFe kontrolni ventil je integrisan u kresač, a komandama se upravlja iz kabine traktora pomoću jedne upravljačke (eng. joystick) ručke. Ovo olakšava instalaciju i značajno poboljšava ergonomiju rada.



Slika 5.30. KESLA 40LFe kresač grana montiran na prikolici

Tabela 5.9. Tehničke karakteritike KESLA 40Fle (www.kesla.com)

Specifikacija	KESLA 40Fle
Masa	365 kg
Dužina rezanja	3,5 m
Pogon	Hidraulički
Maksimalni prečnik rezanja	40 cm
Kontrolni sistem	Električni, upravljanje iz kabine traktora pomoću joysticka
Montiranje	A-frame stabilizatori KESLA 200-serije, KESLA šumarska prikolica ili podizač na traktoru u tri tačke
Kontrolni ventil	Integrisan u kresač
Hidraulički protok	80–120 l/min
Maksimalni pritisak	200 bar
Dužina poteza	70 cm
Preporučena snaga traktora	60 kW (80 KS) ili više
Potreban broj hidrauličnih izlaza	2

5.4. Mašine za guljenje kore

Mašine za guljenje kore drveta (debarkeri) omogućavaju efikasno uklanjanje kore sa trupaca, čime se olakšava dalja obrada drveta i poboljšava kvalitet finalnih proizvoda. Debarkeri se koriste u raznim industrijama, uključujući industriju papira, drvne građe i biogoriva. Guljači kore drveta dolaze u različitim oblicima, od ručnih alata do industrijskih mašina, i mogu se koristiti za različite svrhe u različitim industrijama. Razvoj i implementacija ovih mašina značajno su doprinijeli povećanju efikasnosti i smanjenju troškova u sektoru prerade drveta. U drvnoj industriji koristi se nekoliko tehnika za odvajanje drveta od kore. Izbor tehnologije često se zasniva na vrsti drveta i daljnoj obradi (Chahal i Ciolkosz, 2019). U praksi, skidanje kore sa drveta ne znači nužno da će drvo biti potpuno bez kore. Prihvatljivi udio kore koja ostaje na drvetu zavisi od konačne upotrebe drveta. Na primjer, drvo koje se koristi za proizvodnju celuloze može tolerisati veću količinu zaostale kore u poređenju sa drvetom namijenjenim za građevinske svrhe (Baroth, 2005).

Guljači kore koji se montiraju na motorne testere predstavljaju korisne dodatke za radnike u šumarstvu, pošto se smatra da i 50% radnog vremena sjekača može otići na guljenje kore, naročito kod četinara (Eker et al., 2011) Princip rada ovih guljača kore je jednostavan. Guljač

se pričvršćuje na motornu testeru, obično na isti način kao i lanac testere. Kada je montiran, pokreće se zajedno s radilicom testere. Rotacioni noževi se postavljaju uz površinu drveta koje treba obraditi. Zbog svoje velike brzine i oštrine, noževi ulaze ispod kore i skidaju je. Ovaj proces je veoma brz i efikasan u poređenju s ručnim guljenjem kore, ali ipak se taj proces zasniva na motor-manuelnom radu, odnosno nije u potpunosti mehanizovan (Slika 5.31).



Slika 5.31. Guljač kore – dodatak na motornu testeru Hotyell (https://snapklik.com/)

Potpuno mehanizovani guljači kore se koriste uglavnom na stovarištima i u pogonima za preradu drveta. Skidanje kore može pomoći u sprječavanju širenja bolesti i štetočina koje se često nalaze ispod kore drveća.

Guljači kore se mogu podeliti na osnovu mobilnosti i pogona na nekoliko kategorija. Ove kategorije omogućavaju prilagođavanje specifičnim uslovima rada i potrebama u industriji obrade drveta.

Prema mobilnosti, guljači kore se dele na stacionarne i mobilne. Stacionarni guljači kore se koriste u stalnim postrojenjima, kao dio proizvodnih linija u pilanama ili fabrikama za preradu drveta. Dizajnirani su za kontinuirani rad sa velikim kapacitetom i obično su povezani sa ostalom opremom unutar postrojenja, često integrisani u automatizovane sisteme. Mobilni guljači kore, s druge strane, namijenjeni su za upotrebu na terenu, posebno u šumarstvu gde se drvo siječe i obrađuje direktno na mestu sječe. Ovi uređaji su postavljeni na prikolice ili kamione, ili su vučene traktorim, što im omogućava lako premještanje, a često su opremljeni sopstvenim izvorima energije kako bi bili autonomni.

Prema pogonu, guljači kore se dele na električne, diesel i benzinske, kao i hidraulične. Električni guljači kore najčešće se koriste u stacionarnim postrojenjima gde je dostupan stabilan izvor električne energije. Nude visoku efikasnost i manje zagađenje, što ih čini pogodnim za rad u zatvorenim prostorima zbog niskih emisija i buke. Diesel i benzinski guljači kore idealni su za mobilne operacije na terenu gde nema stalnog pristupa električnoj energiji. Imaju veću autonomiju i snagu, omogućavajući rad u udaljenim ili teško dostupnim područjima, ali emituju više buke i zagađenja. Hidraulični guljači kore mogu biti dio većih sistema gde se koriste hidraulički pogoni, često u industriji drveta za specifične zadatke.

Postoji nekoliko tipova mehanizovanih debarkera koji se koriste u zavisnosti od specifičnih potreba i uslova rada.

Debarkeri se mogu podijeliti na tri glavne vrste prema mehanizmu koji koriste za skidanje kore sa drveta: debarkeri s diskovima, debarkeri s rotirajućom glavom i lančani debarkeri.

- Debarkeri s diskovima koriste rotirajuće diskove opremljene oštrim zupcima ili noževima. Princip rada ovih debarkera zasniva se na tome da se trupac provlači između rotirajućih diskova, pri čemu oštrice na diskovima skidaju koru sa površine drveta. Diskovi se mogu podešavati kako bi se prilagodili različitim veličinama trupaca i debljini kore.
- Debarkeri s rotirajućom glavom koriste glavu koja se rotira velikom brzinom, a na kojoj su montirani rezači ili noževi. Dok se glava rotira, noževi skidaju koru sa trupca. Trupac se može rotirati ili pomicati naprijed-nazad kako bi se osiguralo potpuno uklanjanje kore. Ovi debarkeri su poznati po svojoj efikasnosti i sposobnosti da brzo obrađuju velike količine drva.
- Lančani debarkeri (eng. flail debarker) koriste lance pričvršćene na rotirajuću osovinu sa oštrim zupcima koji se kreću velikom brzinom duž površine trupca. Kada se trupac provuče kroz mašinu, lanci režu i uklanjaju koru. Ovi debarkeri su idealni za grube i nepravilne trupce i često se koriste na terenu za operacije u šumi.

Rotacioni debarkeri imaju noževe koji, uz pomoć hidraulike, održavaju kontakt s površinom drveta dok drvo prolazi kroz mašinu. Drvo se može rotirati dok prolazi kroz guljač, ili se noževi okreću oko drveta na rotoru. Broj noževa varira u zavisnosti od primjene. Valjci za dovod guraju i vuku drvo kroz mašinu. Za visoku produktivnost mora biti obezbijeđeno konstantno snabdijevanje trupcima. Rotacioni guljači kore su osjetljivi na veličinu komada jer se istovremeno obrađuje samo jedan trupac ili drvo (Slika 5.32). Guljenje kore na terenu, u sječini, se rijetko primjenjuje, uglavnom u plantažama.



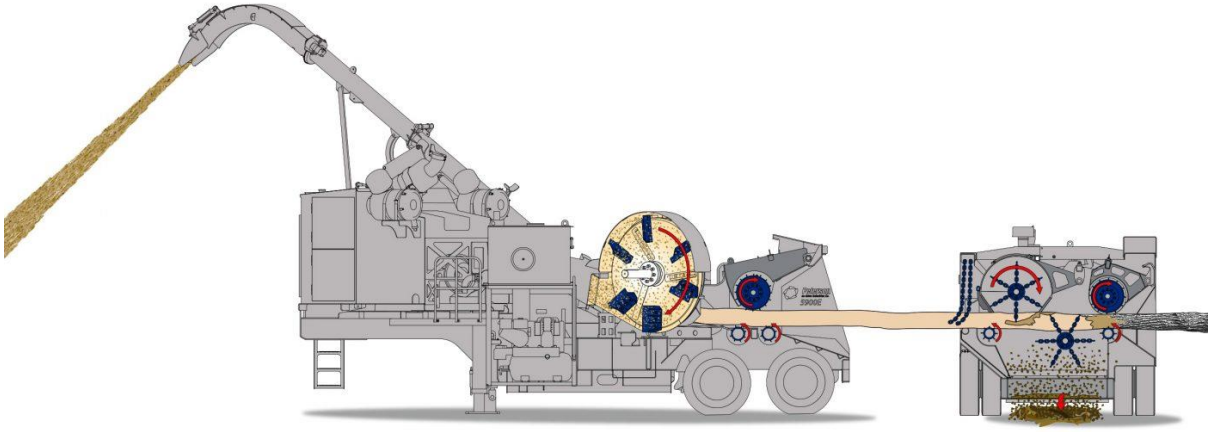
Slika 5.32. Valon Kone VK8000HD-COMBI-2R - rotacioni debarker

Lančani debarkeri se koriste za skidanje kore i grana sa trupaca. Mogu biti stacionarni, smješteni na pilanama ili centralnim stovarištima, ili mobilni. Oni skidaju koru i grane koristeći čelične lance, monirane na rotirajuće bubnjeve koji prave kontakt s korom drveta udarajući je. Zbog visoke adhezije kore mogu se koristiti dva lanca po dodatku na bubnju. Broj bubnjeva po mašini varira od dva do četiri. Više bubnjeva će rezultirati boljim kvalitetom skidanja kore i grana, međutim previše udara može prouzrokovati oštećenje i gubitak vlakana. Često se poslednji bubanj koristi kao bubanj za čišćenje. Ovaj bubanj se rotira u suprotnom smeru u odnosu na druge sprečavajući da se kora izbaci sa okoranim drvetom. Kod većih mašima kora pada na dno i izbacuje se hidrauličnim potiskivačom. Brzina rotacije lanca, brzina hranjenja

drvetom, veličina drveta, vrsta, broj grana i stanje lanaca utiču na kvalitet skidanja kore sa drveta (Hartsough et al., 2000).



Slika 5.33. Lančani guljač Peterson 4810F (www.construction.altg.com)



Slika 5.34. Prikaz rada debarkera Peterson 4810F u kombinaciji s iveračem (www.wajax.com)

Tabela 5.10. Specifikacije guljača kore Peterson 4810F i Valon Kone VK8000HD-COMBI-2R

Specifikacija	Peterson 4810F	Valon Kone VK8000HD-COMBI-2R
Tip	Lančani debarker	Rotacioni debarker
Mehanizam	Lančani flail	Diskovi sa hidrauličkim pritiskom
Snaga motora	350 konjskih snaga (261 kW)	
Prečnik trupaca (maksimalni)	58 cm	80 cm
Masa	20,411 kg	38,000 kg
Efikasnost	Do 70 trupaca po satu	Do 60 trupaca po satu
Radni pritisak	275 bar	250 bar
Sistem upravljanja	Elektronski kontrolisan	Hidraulični sistem
Potrošnja goriva	175 galona (662 litara) po smjeni	-

Savremene kombinovane mašine, kresači grana – guljači kore su u stanju da obrađuju više od jednog stabla istovremeno, što ih čini pogodnim za obradu više manjih stabala odjednom. Nude promenljive brzine hranjenja i kretanja bubnja što omogućava povećan kvalitet skidanja kore bez oštećenja vlakana. Prema istraživanjima Spinelli i dr. (2019) na tri Peterson Pacific DDC 5000 H jedinice koje je brazilska kompanija Fibria Celulose koristila tokom tri godine, prosječna produktivnost bila je 88 m³ bez kore po produktivnom radnom satu (PMH). U istom istraživanju nije pronađena zavisnost između prečnika trupaca i produktivnosti, što govori da

na produktivnost neki drugi faktori imaju značajniji uticaj, kao što je brzina hranjenja i organizacija rada.

Pošto se skidanje grana i kore često vrši na šumskom putu, teško je operisati sa velikom količinom drvnog ostatka (kora, list, grane, grančice, odsječci) koji tu nastaje. Da bi se smanjila količina ostataka, vrhovi i veće grane drveća se ponekad uklanjaju kod panja i ne dovoze se do mašine. Ako se drvni ostaci koriste (npr. transportuju se u postrojenje za proizvodnju toplotne ili električne energije), ovaj sistem je idealan jer se ostaci mogu sakupljati direktno iz guljača kore u transportno vozilo ili privremeno skladištiti na stovarište, prije transporta. Lančani skidači grana i kore se često mogu montirati na prednju stranu utovarivača, ili se kombinuje sa iveračem, što je češća opcija. Tada se dobija čitav sistem koji zahtjeva veliku količinu drveta da bi bio ekonomski isplativ.

5.5. Mašine za cijepanje drveta

Uređaji i mašine za cijepanje drveta u šumarstvu igraju ulogu u obradi drveta, posebno u pripremi drvenih sortimenata za različite namjene kao što su ogrev, celuloza i drugi proizvodi. Drvo se cijepa da bi se usitnilo i pripremilo za daljni transport ili obradu. Uglavnom se cijepaju trupci lošijeg kvaliteta koji ne mogu biti tehničko drvo ili oblice i ostali dijelovi granjevine, gdje se cijepanjem dobija ogrevno drvo.

Ovi uređaji se dijele na nekoliko osnovnih kategorija prema njihovoj mobilnosti, vrsti pogona, načinu rada i specifičnim funkcijama. Cijepanje se može vršiti ručno, raznim oruđem, kao što su sjekire i klinovi, ili mehanizovano uz pomoć različitih vrsta cjepača. Cijepanje drveta može biti dugotrajan i fizički naporan posao, posebno kada se radi sa većim komadima drveta. Korišćenjem cjepača, ovaj proces postaje automatizovan i mnogo brži, omogućavajući radnicima da brže i efikasnije obrade veće količine drveta.

Mašine za cijepanje se mogu podijeliti na mobilne i stacionarne. Mobilne mašine se češće koriste, prenose i pogone ih najčešće traktori. Prema vrsti pogona, ove mašine se dijele na mehanične i hidrauličke. Dodatne podjele uključuju način kretanja alata i drveta, oblik alata i broj dijelova na koje klin cijepa drvo u jednom prolazu.

Prema vrsti pogona, mašine za cijepanje se dijele na mehaničke i hidraulične. Mehaničke mašine koriste snagu motora i različite mehaničke prijenosne sisteme za cijepanje drveta. Hidraulične mašine koriste hidraulički pritisak za pogon alata, što omogućava veću snagu i preciznost u cijepanju.

Mašine za cijepanje se dalje dijele prema orijentaciji i načinu rada na vertikalne i horizontalne. Horizontalne mašine mogu imati sto ili se cijepanje obavlja u koritu na zemlji, dok vertikalne mašine omogućavaju bolju vizualnu kontrolu i preciznije cijepanje.

Specifične funkcije mašina uključuju različite načine kretanja alata i drveta, oblik alata i broj dijelova na koje klin cijepa drvo u jednom prolazu. Na primjer, mašine za cijepanje u drvnim skladištima mogu biti opremljene stolovima za preciznije cijepanje specijalnih sortimenata, kao što su rezonantno drvo ili drvo za šindre.

Postoje i specijalizovani uređaji kao što su rotcioni konusi za cijepanje i cijepalice koje se montiraju na bagerima. Ovi uređaji su praktični jer omogućavaju i rukovanje trupcima i cijepanim drvetom.

Cjepači drveta s klinom za cijepanje

Cjepači drveta s klinom za cijepanje koji se pogone električno ili hidraulično omogućavaju brzo i efikasno cijepanje drveta. Koriste snagu elektromotora ili hidrauličnih sistema za stvaranje potrebnog pritiska i sile za cijepanje drveta. Električni cjepači su obično manji i koriste se za lakše poslove, dok hidraulički cjepači, zahvaljujući svojoj visokoj snazi, mogu obraditi veće i tvrđe komade drveta.

Jedna od ključnih karakteristika ovih cjepača je njihova mogućnost montiranja u tri tačke kao traktorski priključak (5.35). Ova opcija omogućava lako transportovanje cjepača do različitih lokacija. Montirani na traktor, ovi cjepači koriste snagu traktora za svoj rad. Pored traktorskih priključaka, ovi cjepači mogu biti samostalno postavljeni na stovarištima ili radnim stanicama. Samostalni cjepači su obično stabilniji i koriste se na mjestima gdje se obrađuju veće količine drveta. Klin za cijepanje, koji je osnovni radni alat ovih cjepača, izrađen je od visokokvalitetnih materijala, kao što je kaljeni čelik i dolaze u različitim oblicima i veličinama.



Slika 5.35. Cjepač drveta montiran na traktor HV 3PT20 (www.woodsplitterdirect.com)

Konusni cjepači

Konusni cjepači drveta, (eng. cone screw splitter) omogućavaju cijepanje velikih komada drveta uz minimalan napor (Slika 5.36). Ova tehnologija se primjenjuje u šumarstvu kada je drvo potrebno usitniti da bi se pojednostavnio transport i kasnija obrada. Princip rada konusnih cjepača drveta zasniva se na korišćenju konusnog vijka koji se rotira i postepeno ulazi u drvo, stvarajući pritisak koji uzrokuje cijepanje drveta duž njegovih vlakana. Konusni vijak je dizajniran tako da progresivno povećava pritisak dok ulazi u drvo, što omogućava ravnomjerno i kontrolisano cijepanje. Ovaj metod je posebno efikasan za cijepanje velikih i čvorovitih komada drveta, koji bi inače zahtijevali znatne napore pri ručnom cijepanju. Konusni cjepači drveta su često opremljeni hvataljkama koje omogućavaju manipulaciju i postavljanje drveta u optimalan položaj za cijepanje. Pored toga, ovi uređaji su relativno jednostavni za održavanje i mogu se prilagoditi različitim vrstama traktora i mašina, što ih čini izuzetno korisnim u različitim radnim okruženjima.



Slika 5.36. Konusni cjepač HF-800 montiran na hidrauličnoj ruci (www.uspridepproducts.com)

Čeljusni cjepači

Čeljusni cjepači trupaca su dizajnirani tako da koriste hidraulične ili mehaničke čeljusti koje hvataju i cijepaju drvo duž njegovih vlakana (Slika 5.37). Primarna upotreba čeljusnih cjepača trupaca je u sječi i pripremi drveta za daljnju obradu, kao što su proizvodnja ogrjevnog drveta, celuloze ili ivera. Ovi uređaji mogu biti montirani na traktore, forvardere bagere ili druga šumska vozila, što im omogućava fleksibilnost i mobilnost na terenu. Hidraulički pogon omogućava visok nivo kontrole i snage. Pored osnovne funkcije cijepanja, čeljusni cjepači trupaca mogu se koristiti i za manipulaciju i transport trupaca, i slučaju da su montirnani na hidraučnu ruku.



Slika 5.37. Različite izvedbe čeljusnih cjepača drveta

Kompleksni cjepači s sistemom za prerezivanje trupaca

Cjepači drveta s mogućnošću prerezivanja trupaca i ugrađenim transporterom za drvo predstavljaju napredne uređaje, omogućavajući efikasnu pripremu drvenih sortimenata za različite namjene. Dva istaknuta proizvođača ovih uređaja su Tajfun i Posch.

Tajfun RCA serija, npr. model RCA 480 Joy, je sposoban da obrađuje drvo prečnika do 48 cm (Slika 5.38). Ovaj uređaj dolazi s ugrađenim transporterom i kombinovanim cjepačem koji omogućava prerezivanje i cijepanje drva u jednom prolazu. RCA 480 Joy ima dvostepeni teleskopski transporter i hidraulični sistem koji omogućava kontinuirano i efikasno manipulisanje drvom. Model je takođe opremljen Oregonovom lančanom testerom, što osigurava precizno prerezivanje, dok hidraulički pogon pruža potrebnu snagu za cijepanje i manipulaciju trupcima.

Posch S-375 Turbo Firewood Processor je opremljen WIDIA cirkularnim listom za prerezivanje trupaca prečnika do 37 cm (Slika 5.39). S-375 takođe dolazi s ugrađenim transporterom koji

omogućava automatsko prebacivanje cijepanih komada na odredišno mjesto. Ovaj uređaj nudi opcije za hidrauličko podešavanje visine cjepača i različite noževe za cijepanje, što omogućava cijepanje na od 4 do 8 cjepanica po prolazu. Model također omogućava jednostavnu promjenu iz režima cijepanja u režim samo prerezivanja, pružajući dodatnu fleksibilnost korisnicima.





Slika 5.38. Tajfun RCA 480 JOY (www.grapak.hr) Slika 5.39. Posch S-375 Turbo (www.posch.com)

Oba proizvođača, Tajfun i Posch, pružaju uređaje koji su prilagođeni za montažu na traktore putem priključka u tri tačke ili za samostalnu upotrebu na stovarištima.

5.6. Mašine za iveranje drveta

Iveranje drveta se definiše kao postupak kojim se šumska biomasa prerađuje u formu pogodnu za upotrebu u toplanama, a potreba za iveranjem se bazira na tome da se omogući automatsko doziranje ivera, ekonomičan transport i lakše sušenje i spaljivanje ivera (Šušnjar, 1998). Sječka ili iver je oblik drvne biomase koji se dobija usitnjavanjem trupaca lošijeg kvaliteta, krošnji, granjevine, te drvnih ostataka. Iveranje drveta omogućava efikasno korišćenje drvnog materijala koji bi inače bio odbačen, pretvarajući ga u koristan resurs za različite svrhe. Iver ili sječa najčešće ima dužinu između 2 i 5 cm, maksimalnu širinu oko 2 cm i debljinu od nekoliko milimetara (Spinelli i Marchi, 2021).
Biomasa može biti iverana u sastojini i zatim transportovana u formi ivera do puta. Najsofisticiranija mašina u ovoj oblasti je Valmet 801 Comby Bioenergy, harvester opremljen iveračem i kontejnerom za iver zapremine 27 m^3 (Marčeta, 2019).
Drvna biomasa u formi granjevine ili uhrpanih tanjih dijelova debla ima koeficijent konverzije u kompaktno stanje (odnos zapremine složaja i kompaktnog stanja) od 0,15 do 0,25. Usitnjena biomasa u formi ivera ima koeficijent konverzije od 0,35 do 0,45, odnosno više nego duplo u odnosu na granjevinu (Johnson, 1989). U istraživanjima su najčešće upoređivana tri metoda iveranja (Hakkila, 2003; Talbot i Suadicani, 2005). Klasifikovani su na bazi mjesta gdje se vrši usitnjavanje i iveranje, pri čemu su karakteristike iverača od velikog značaja.

Iveranje nije jednostavna operacija, i potrebno je mnogo tehničkog znanja za efikasnu implementaciju (Anderson i Mitchell, 2016). Postoji nekoliko metoda i tehnologija iveranja

koje se koriste u šumarstvu i drvnoj industriji (Ranta, 2005; Junginger et al., 2005; Johansson et al., 2006).

Metode iveranja:

1. Iveranje u sječini: Ovo podrazumijeva usitnjavanje drvnog materijala direktno na mjestu sječe. Ova metoda je efikasna jer smanjuje potrebu za transportom neobrađenog drveta do druge lokacije za preradu.
2. Iveranje na šumskom stovarištu: Ova metoda uključuje transport drvnog materijala do šumskog stovarišta gdje se vrši usitnjavanje. Ovo omogućava centralizaciju operacija i može poboljšati logistiku.
3. Iveranje na centralnom stovarištu za preradu: Uključuje transport drvnog materijala do centralne lokacije, kao što su pilane ili postrojenja za preradu. Ova metoda je pogodna za velike količine drveta i omogućava bolju kontrolu nad kvalitetom proizvedene sječke.

Iverači se mogu podijeliti na iverače s diskom, iverače s bubnjem i konusno-zavrtne iverače (Spinelli i Marchi, 2021). Kupac i potrošač određuju svrhu upotrebe ivera i specifikacije koje ona mora zadovoljiti. Prema kapacitetu, mogu se podijeliti na male, srednje i velike. Mali iverači su pogodni za male proizvodne pogone i kućnu upotrebu na malim posjedima i u privatnim šumama. Srednji se koriste u srednjim industrijskim pogonima ili za terensko iveranje u šumarstvu, dok su velikog kapaciteta namenjeni za velike industrijske pogone, velika stovarišta i kontinuiranu proizvodnju.
Prema načinu pogona, iverači mogu biti električni, hidraulični ili dizel. Električni iverači koriste elektromotore za pogon uređaja se iveranje. Hidraulični iverači koriste hidraulični sistem, koji omogućava visoku efikasnost i preciznu kontrolu, Dizel iverači koriste dizel motore, što ih čini pogodnim za mobilne jedinice i rad na terenu.

Iver se može koristiti za tehnološke ili energetske svrhe:

- Tehnološki iver: Mora ispunjavati specifične zahtjeve u pogledu veličine, udjela zelene materije, kore i drugih dodataka. Kvalitet tehnološkog ivera je viši, a oprema za proizvodnju je složenija.
- Energetski iver: Koristi se za sagorijevanje i kao izvor energije. Zahtjevi za energetski iver su niži, a mašinska oprema je jednostavnija.

Intenzitet proizvodnje i kvalitet ivera zavise od metoda sječe, izrade i načina prikupljanja drvnog ostatka. Mehanizovano privlačenje ostataka sječe može dovesti do kontaminacije drvnog otpada mineralnim primjesama i drugim nečistoćama, što otežava iveranje zbog zatupljivanja ili oštećenja reznog alata iverača. Iver sadrži i koru koja u nekim slučajevima nije pogodna za korišćenje, pa je potrebno obaviti separaciju. Pri tom se koristi manja masa ivera sa korom od ostalog ivera. Iver se razduvava ventilatorima i kvalitetniji i masivniji, koji dalje leti, se odvaja od onog sa korom, koji odmah pada.
Mobilni iverači variraju od malih jedinica za drvne ostatke do velikih jedinica koje mogu usitnjavati cijela stabla. Odabir iverača odgovarajućeg kapaciteta je ključan za projektovanje sistema iveranja (Stampfer i Kanzian, 2006). Ukoliko je sječka namijenjena za sagorijevanje,

obično postoji samo jedna linija obrade. Međutim, ukoliko je potrebno ukloniti male i velike komade, koristi se posebna linija za standardizaciju sječke.

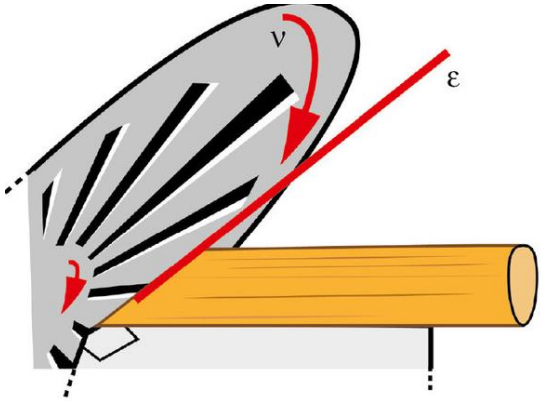
Postoji mnogo različitih izvedbi iverača. Mobilni iverači dostupni su u različitim modelima: nošeni kao priključak traktora, montirani na prikolici ili vozilu poput kamiona, forwardera ili namjenski izgrađenog vozila (Mihelič et al., 2015). Iverač može biti dio veće integrisane mašine, kao što je lančani delimber-debarker iverač ili kombinovani sjekač-iverač, koji se često koriste na plantažama brzorastućeg drveća (Spinelli i de Arruda Moura, 2019).

Iverač može biti pogonjen motorom traktora ili vozila na kojem se nalazi, ili imati nezavisni motor. Generalno, mašine sa nezavisnim motorom su snažnije od traktorski pogonjenih mašina, ali razlika se smanjuje razvojem snažnijih traktora. Obično, traktorski pogonjeni iverači su manje produktivni od onih sa nezavisnim motorom zbog manje snage; međutim, za istu snagu, produktivnost i efikasnost se ne razlikuju značajno između dva glavna tipa (Spinelli i Marchi, 2021). Isto važi i za troškove održavanja (Spinelli et al. 2019).

Izbor između različitih rešenja zavisi od učestalosti relokacija, udaljenosti relokacija i karakteristika terena. Ako se iveranje obavlja direktno u šumi i obrađuju se relativno velike parcele, najbolji izbor je iverač montiran na forwarderu zbog pogodnosti za šumski transport. Ako je relokacija česta i iveranje se obavlja pored puta, iverač montiran na kamionu je bolji, posebno ako relokacija prelazi nekoliko kilometara (Marchi et al. 2011). Industrijski iverač (snaga > 200 kW) je jedino rešenje kada se obrađuje preko 20,000 m³ ivera godišnje.

5.6.1. Iverači s diskom

Ovi uređaji koriste rotirajući disk s noževima za usitnjavanje drveta. Diskovi koriste momentum rotacije za održavanje brzine iveranja, što smanjuje potrošnju energije. Uređaj za sječenje sastoji se od teškog zamajca koji nosi dva, tri ili četiri noža postavljena u radijalnim položajima (Slika 5.40). Drvo se gura prema rotirajućem disku pod blagim uglom, tako da noževi mogu da sijeku tanke slojeve s njega. Otvori postavljeni odmah ispod svakog noža omogućavaju da iver prođe kroz disk prema ventilatoru, koji ga izbacuje iz mašine kroz odvodnu cijev. Podesivi graničnik djeluje kao nakovanj (ili kontra-nož) i podržava rad noževa. Ovi iverači su efikasni za drvo većeg prečnika.



Slika 5.40. Princip rada disk iverača (Gard Timmerfors et al., 2020)

Na narednim slikama i u Tabeli 5.11. su primjeri dva iverača s diskom.





Slika 5.41. Mobilni disk iverač J.P. Carlton 2018HD (www.stumpcutters.com) Slika 5.42. Stacionarni disk iverač Bruks RH2500 (bruks-siwertell.com)

Tabela 5.11. Tehničke karakteristike J.P. Carlton 2018HD i Bruks RH 2500 iverača

Specifikacije	J.P. Carlton 2018HD	Bruks RH 2500
Kapacitet iveranja	45,72 cm (prečnik)	50 cm (prečnik)
Sistem hranjenja	Hidraulički sistem sa visokim obrtnim momentom	Hidraulički sistem sa dvostrukim valjcima
Motor	John Deere 6068T Turbo Diesel, 127 kW (170 HP)	Različite opcije elektromotora, do 2500 kW
Težina	5534 kg	15,000 kg
Dimenzije diska	139,7 cm prečnik, 5,08 cm debljina sa 2,54 cm pojačanjem	150 cm prečnik, 6 cm debljina
Otvor za hranjenje	50,8 x 45,72 cm	60 x 50 cm
Kapacitet rezervoara za gorivo	235 litara	
Sistem hlađenja	Vodeno-hladni sistem sa antifrizom	Hidraulični sistem za hlađenje
Sistem podmazivanja	Potpuni protok sa spin-on filterom, 12,3 litra kapacitet	Automatski sistem podmazivanja, 15 litara kapacitet
Hidraulički sistem	Direktni pogon sa pumpom, 95 litara po minuti, 207 bara, 76 litara kapacitet	Direktni pogon sa dvostrukom pumpom, 120 litara po minuti, 250 bara, 100 litara kapacitet
Sistem izbacivanja	Hidraulično podesiva zakretna cijev	Podesiva zakretna cijev sa daljinskim upravljanjem
Produktivnost	do 50 m^3/h	do 650 m^3/h

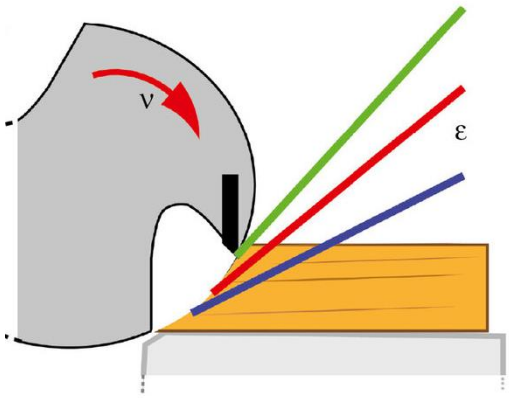
5.6.2. Iverači s bubnjem

Ovi uređaji koriste bubanj s noževima za usitnjavanje kraćih i tanjih komada drveta. Često se koriste za usitnjavanje drvnih ostataka i manjih prečnika.

Iverači s bubnjem koriste masivni horizontalni čelični bubanj (cilindar) koji se okreće oko svoje ose (Slika 5.41). Noževi su montirani na spoljašnju površinu bubnja, u tangencijalnom položaju. Broj noževa zavisi od proizvođača i varira od 1 do više od 20. U principu, postoje dve konfiguracije: jedna u kojoj svaki pojedinačni nož pokriva cijelu širinu bubnja, i druga u kojoj pokriva samo dio širine. U drugom slučaju, bubanj će biti opremljen sa više noževa postavljenih u zvjezdastom položaju, tako da je cijela površina obrađena, ali ne u isto vreme. U osnovi, svaki pun obrtaj bubnja rezultira mnogim malim "ugrizima", umesto jednog ili dva velika. Prednost korišćenja zvjezdasto postavljenih noževa je uglavnom u mogućnosti ograničenja troškova bilo kakvog oštećenja: naime, kritična oštećenja su obično tačkasta – npr. dešavaju se na širini od nekoliko centimetara – ali u tom slučaju nož mora biti zamijenjen,

a trošak noža mora biti proporcionalan njegovoj veličini. Stoga, oštećenje od nekoliko centimetara na nožu pune širine i dalje zahtjeva zamjenu cijelog noža, sa mnogo većim troškom nego kod manjeg noža. Kao i kod disk iverača, bubanj iverači su takođe opremljeni nakovnjem, koji je neophodan za postizanje čistog sječenja (Spinelli i Marchi, 2021).

Bubnjevi mogu biti otvoreni ili zatvoreni. Otvoreni bubanj se sastoji od serije masivnih čeličnih diskova koje se nalaze oko centralne ose, sa nosačima noževa fiksiranim u prostorima između diskova. Nasuprot tome, zatvoreni bubanj se sastoji od kompletnog cilindra, sa udubljenjima (ili džepovima) izrezanim neposredno ispod noževa tako da se isječeno drvo uvlači u džep i prenosi do ventilatora postavljenog na drugom kraju kućišta bubnja, nasuprot ulaznom otvoru. U principu, ne postoje značajne razlike u performansama otvorenih i zatvorenih iverača s bubnjem, barem što se tiče produktivnosti i potrošnje. Međutim, nedavne studije ukazuju da je kvalitet proizvoda bolji kod zatvorenih iverača prilikom rada sa granama i drugim otpadnim materijalom, posebno ako su noževi istrošeni. S druge strane, oba rješenja nude vrlo dobar proizvod prilikom rada sa novim noževima i/ili drvetom dobrog kvaliteta kao što su trupci, balvani itd. (Spinelli et al., 2015). Na iveračima s bubnjem moguće je instalirati sito na izlazu, između komore bubnja i ventilatora, tako da se svi preveliki komadi uhvate i vrate u iverač za dalju obradu. Ova mogućnost je česta kod svih mašina evropske proizvodnje, dok je američke mašine često nemaju (Spinelli i Marchi, 2021).
Iverači s bubnjem su produktivniji od iverača s diskom, s razlikom od oko 10%. S druge strane, bubanjski iverači su manje energetski efikasni i troše oko 20% više goriva nego disk iverači po zapremini proizvedenog ivera. Visoka energetska efikasnost disk iverača je povezana s njihovom jednostavnijom konstrukcijom. Bubanjski iverači takođe imaju tendenciju da proizvode sitniji iver s većim procentom prašine. To je djelimično zbog prisustva sita, koja doprinose fragmentaciji ivera i generisanju prašine (Spinelli et al., 2013)



Slika 5.43. Princip rada iverača s bubnjem (Gard Timmerfors et al., 2020)

Na narednim slikama i u Tabeli 5.12. su primjeri dva iverača s bubnjem.



Slika 5.44. Iverač s bubnjem Jenz Hem 542 Z (www.jenz.de)



Slika 5.45. Iverač s bubnjem BRUKS 1006 PT Truck (www.bruks-siwertell.com)

Tabela 5.12. Tehničke karakteristike Jenz Hem 542 Z i BRUKS 1006 PT Truck iverača

Specifikacije	Jenz Hem 542 Z	BRUKS 1006 PT
Kapacitet	54 cm (prečnik)	60 cm (prečnik)
Sistem hranjenja	Hidraulički sistem sa valjcima	Hidraulički sistem sa valjcima
Opcije motora	Traktorski pogon (PTO)	Pogon kamionskim motorom
Težina	7,500 kg	26,000 kg (s kamionom)
Dimenzije diska/bubnja	820 mm promjer bubnja	N/A
Otvor za hranjenje	85 x 68 cm	1200 mm
Sistem hlađenja	Vazdušno hlađenje	Hidraulični sistem sa električnim ventilatorom
Sigurnosne karakteristike	Sigurnosni prekidači i senzori	Sigurnosni senzori i kontrolni sistem
Hidraulički sistem	Hidraulični pogon valjaka	Hidraulični sistem sa promjenljivim pumpama
Sistem izbacivanja	Podesiva zakretna cijev	Cijev sa akceleratorom za iver
Produktivnost	do 140 m^3/h	do 200 m^3/h

Jenz Hem 542 Z je pogodan za manje operacije i rad na ograničenim prostorima, dok BRUKS 1006 PT nudi veću produktivnost i kapacitet za teže zadatke. Oba modela pružaju visoku efikasnost i kvalitet ivera, ali BRUKS 1006 PT je bolje prilagođen za intenzivan rad na većim stovarištima zahvaljujući svojoj većoj težini i naprednijim sistemima za kontrolu i izbacivanje ivera.

5.6.3. Konusno-zavrtni iverači

Zasnovani su na čeličnom konusu s jednom oštricom postavljenom u spiralu duž površine konusa. Materijal zahvata oštrica i uvlači ga u komoru za iveranje gdje se vrši usitnjavanje. Veličina ivera određena je nagibom zavrtnja, tj. razmakom između dva namotaja iste spirale. Također, nakovanj (ili kontra-nož) je postavljen između oštrice i kućišta koje sadrži sam konus, kako bi podržao drvo tokom sječenja (Wegener i Wegener, 2012). Ova vrsta iverača nije postigla veliki uspjeh, dijelom zato što je prilično zahtjevan za upotrebu (Spinelli i Marchi, 2021).
Princip rada konusnog zavrtnja ima dvije važne karakteristike. Konus uvlači materijal za iveranje bez potrebe za posebnim sistemom hranjenja, što smanjuje troškove i težinu mašine. Međutim, brzina uvlačenja se ne može modulirati, što može dovesti do zagušenja mašine ako se preoptereti materijalom (Wegener i Wegener, 2014). Konus ima mnogo manju masu od diska ili bubnja i geometriju koja nije pogodna za akumulaciju inercijalnih sila. To znači da mašina akumulira relativno malo energije i ne može da se nosi sa promenljivim zahtjevima za snagom. Zbog toga su konusno-zavrtni iverači skloni zagušenju ako se ne hrane pažljivo. S druge strane, konusno-zavrtni iverač proizvodi kvalitetniji iver od ostalih ivrača, pod uslovom da se hrani trupcima odgovarajuće veličine (Spinelli i Marchi, 2021).

5.7. Harvester

Razvoj harvestera počinje 1957. godine kada se mladi student mašinstva iz tadašnje Čehoslovačke, Rudy Vit, uključuje u projekat za razvoj mehanizovanog uređaja za sječu stabala. Ova mašina je koristila dvije tadašnje inovacije – hidrauliku i testere s lancem. Sječna jedinica koja se sastojala od dvije testere lančanice, bila je postavljena na prednji dio motornih sanki Bombardier HDW. Jedna testera je obavljala podrezivanje, dok je druga potpuno odvajala stablo od panja. Posječeno stablo bi se zatim spustilo na nosač na stražnjem dijelu koji je imao nosivi kapacitet od nekoliko stabala (Bačić, 2015). Godinu dana nakon što je Rudy Vit konstruisao mašinu za sječu stabala, John Pope dizajnira još jednu preteču harvestera, postavljajući hidrauličku sječnu glavu na dozer. Sječna glava je slična sječnoj glavi konstruisanoj od strane Rudya Vita. Nakon sječe, stablo se rotira u horizontalan položaj i polaže u glavu za kresanje grana. Nakon što je stablo okresano, sječnom glavom se obavlja prerezivanje. Glavni nedostatak dva spomenuta uređaja je činjenica da su oba morala biti u neposrednoj blizini stabla da bi se ono uspješno oborilo (Bačić, 2015). Godine 1959. Jack Boyd konstruiše mašinu koja rješava nedostatak prve dvije. Timberbuncher je u suštini bager koji na svojoj hidrauličnoj dizalici ima sječnu glavu sa kliještima i kružnom testerom. Služio je za obaranje i slaganje stabala u hrpe. Značaj ove mašine je u primjeni hidraulične dizalice pri mašinskoj sječi. Ovaj koncept se koristi i u današnjim modernim harvesterima. Godine 1963. Bob Larson razvija Beloit harvester koji se sastojao od buldozera i hidraulične dizalice. Na hidrauličnoj dizalici nalazila se sječni uređaj sa noževima za kresanje grana i hidrauličnim makazama za obaranje stabla (Bačić, 2015). Godine 1959. Tom Busch konstruira Busch combine – harvester na šasiji zglobnog traktora. Prilikom obaranja morao je prići stablu, a

samo obaranje se obavljalo hidrauličnim makazama. Oboreno stablo se zatim spuštalo u prikolicu za kresanje i prerezivanje. Trupci su se vezali u svežnjeve i izbacivali na zemlju. Šezdesetih godina prošlog vijeka, Koehring – Waterous započinje rad na harvesteru koristeći Dowty šasiju. Harvester je imao hidrauličnu dizalicu sa hidrauličnim makazama za obaranje stabala. Nakon obaranja, stablo se okretalo uspravno i spuštalo u procesorsku glavu. Okresani i prerezani trupci su se vezali u svežnjeve i izbacivali na tlo (Bačić, 2015). Prvi jednozahvatni harvester razvila je i proizvela švedska tvrtka SP Maskiner 1983. godine. Harvester je bio opremljen jednozahvatnom harvesterskom glavom SP 21, prvom takvog tipa. Jednozahvatni harvester kombinuje funkcije procesora i feler bančera u jednoj mašini.
Tokom 1970-ih i 1980-ih godina, harvesteri su se značajno unaprijedili, intregrišući napredne hidraulične sisteme i kompjuterske kontrole, što je omogućilo precizniji i brži rad. 1990-e godine donijele su dalji napredak s razvojem kompjuterizovanih sistema za mjerenje i optimizaciju. Ovi sistemi omogućili su operaterima da precizno sijeku stabla i maksimalno iskoriste drvnu masu. Paralelno s tim, povećala se pažnja na ekološke aspekte, što je dovelo do razvoja mašina koje imaju fokus na smanjenje oštećenja zemljišta i vegetacije. U 21. vijeku, harvesteri su postali visoko sofisticirane mašine opremljene GPS tehnologijom, naprednim senzorima i integrisanim sistemima za prikupljanje podataka. Moderni harvesteri omogućavaju optimizaciju cijelog procesa sječe, od planiranja do završne obrade stabala. Posljednjih godina, fokus je također na razvoju hibridnih i električnih harvestera, koji nude veću energetsku efikasnost i smanjenje emisija štetnih gasova, usklađujući tehnološki napredak s potrebama održivog gazdovanja šumskim resursima.

Moderni harvesteri su višefunkcionalne mašine namijenjene za rad u šumi, koje vrše sječu, obaranje, presijecanje, kresanje i slaganje u jednom radnom ciklusu. Radni uređaj im je harvesterska glava koja je opremljena najčešće testerom s lancem, noževima za kresanje grana, pomičnim valjcima i mjernim uređajima. Harvester imaju zglobno upravljanje, a ako imaju više od četiri točka tada imaju i bugi (eng. boogie) most koji omogućava veću stabilnost prilikom obaranja stabla, ali i olakšava kretanje po terenu (Krpan i Poršinsky, 2001). Pri radu se vrši i premjer izrađenog drveta. Prema konstrukcionim parametrima namijenjeni su širokom spektru poslova i radnih uslova. Koriste se u prorednim, glavnim i sanitarnim sječama. Često se koriste u kombinaciji sa forvarderima ili traktorskim ekipažama i tada zajedno s drugom mehanizacijom čine sistem iskorišćavanja šuma cut-to-length (eng. harvesting sistem cut-to-length).
Potrebno je napraviti razliku između namjenski napravljenih harvestera i adaptiranih bagera opremljenih harvesterskom ili procesorskom glavom. Razlika leži u njihovoj konstrukciji, funkcionalnosti i efikasnosti. Namjenski napravljeni harvesteri su dizajnirani i konstruisani isključivo za sječu i obradu drveća. To uključuje stabilnu i robusnu šasiju koja omogućuje rad u teškim terenskim uslovima, napredne hidraulične sisteme za precizno rukovanje harvesterskom glavom, i kabinu koja pruža maksimalnu udobnost i sigurnost operateru. Harvesteri su također opremljeni naprednim tehnologijama za praćenje i optimizaciju rada, poput GPS-a, senzora i računarskih sistema.

S druge strane, adaptirani bageri opremljeni harvesterskom ili procesorskom glavom su standardni građevinski bageri koji su prilagođeni za šumarske operacije. Ovi bageri zadržavaju svoju osnovnu konstrukciju i funkcionalnost, ali im se dodaje harvesterska ili procesorska glava kako bi mogli obavljati zadatke sječe i obrade drveća. Adaptirani bageri imaju određene prednosti, kao što su veća fleksibilnost u korišćenju (mogu se koristiti i za druge građevinske zadatke) i niži troškovi u poređenju s namjenski napravljenim harvesterima. Međutim, adaptirani bageri imaju i određena ograničenja. Njihova konstrukcija nije optimizovana za rad u šumi, što može rezultirati manjom efikasnošću i većim troškovima održavanja. Takođe, hidraulični sistemi i stabilnost mogu biti manje prilagođeni za rad u teškim šumskim uslovima, što može uticati na preciznost i sigurnost tokom rada. Kabine adaptiranih bagera često nisu dizajnirane s fokusom na ergonomiju i sigurnost operatera u teškom terenskim uslovima, kao što je slučaj s harvesterima.

5.7.1. Podjela harvestera

Osnovna podjela harvestera može se izvršiti na osnovu nekoliko ključnih karakteristika: tipa šasije, dimenzija, mase, snage motora, kao i tipa pogonskog i radnog mehanizma (Bystrický et al., 2011). Svaka od ovih karakteristika ima važan uticaj na performanse i primjenu harvestera u različitim šumskim operacijama.

Harvesteri mogu biti opremljeni različitim tipovima šasija, a uglavnom se dijele na one koji imaju točkove i one koje imaju gusjenice. Harvesteri s točkovima su pokretljiviji i brži na terenu, što ih čini pogodnim za rad na ravnijim i manje zahtjevnim terenima. Harvesteri s gusjenicama imaju veću stabilnost i bolje prijanjanje na teškim i neravnim terenima, što ih čini idealnim za rad na strmim nagibima ili močvarnim područjima. Postoje i harvesteri sa polugusjenicama, koji kombinuju prednosti oba sistema. Polugusjenice se montiraju na točkove mašina, pružajući dodatnu stabilnost i bolje prijanjanje, što je posebno korisno u teškim terenskim uslovima. Integracija polugusjenica pruža optimalnu kombinaciju brzine, pokretljivosti i terenskih sposobnosti, a ova fleksibilnost je posebno korisna u šumarstvu, gdje se terenski uslovi mogu značajno mijenjati unutar istog radnog područja. Postoje i takozvani „hodajući harvesteri“ koji se kreću uz pomoć specijalno konstruisanih nogu, slično hodanju (Slika 5.46).

Na osnovu prečnika stabala koje mogu obraditi, harvesteri se mogu podijeliti u tri grupe:

- Mali (namijenjeni za lakše sastojine i njegu šuma),
- Srednje veličine (najviše namijenjeni za prorede sastojina),
- Veliki (namijenjeni za prorjeđivanje, završnu sječu i sanaciju šuma) (Malík i Dvořák (2007).

Tabela 5.13. Podjela harvestera prema kapacitetu (Malík i Dvořák, 2007)

	Mali	Srednje veličine	Veliki
Snaga motora (kW)	manje od 70	70 - 140	preko 140
Masa (t)	4 - 8	9 - 13	13 - 15 (18)
Širina (cm)	160 - 200	240 - 280	260 - 290

Dohvat dizalice (m)	6	8.5 - 10	10 - 11 (15)
Zapremina stabla (m^3/stablo)	do 0.15	do 0.35	preko 0.35
Maks. prečnik sječe (cm)	20 - 35	35 - 45	45 - 65
Performanse (m^3)	3 - 5	4 - 8	5 - 15
Performanse (hilj.m^3/god)	7 - 8	12	18

Podjela harvestera na osnovu njihovih karakteristika omogućava šumarskim operativcima da odaberu odgovarajući model za specifične uslove rada i tipove sječa. Dimenzije harvestera variraju u zavisnosti od njihove namjene. Manji harvesteri su kompaktni i lakši za manevrisanje u gustim sastojinama ili mladim plantažama, dok su veći harvesteri dizajnirani za obradu velikih stabala i rad u otvorenijim područjima (Ackerman et al, 2022). Masa harvestera utiče na stabilnost i pritisak na zemljište. Harvesteri veće mase pružaju veću stabilnost pri radu s voluminoznim stablima, dok lakši harvesteri smanjuju oštećenje šumskog tla, što je posebno važno u ekološki osjetljivim područjima. Snaga motora je ključna za performanse harvestera, jer utiče na njegovu sposobnost da se nosi s različitim vrstama terena i dimenzijama stabala. Pogonski mehanizmi harvestera mogu biti mehanički, hidraulični ili kombinacija oba. Hidraulični sistemi omogućavaju preciznu kontrolu i fleksibilnost u radu s sječnim glavama, dok mehanički sistemi pružaju dodatnu snagu i pouzdanost. U posljednje vrijeme sve više se razvijaju različiti hibridni sistemi (Einola i Kivi, 2024).

Radni mehanizmi harvestera uključuju različite vrste sječnih glava, koje mogu biti opremljene cirkularnim testerama, testerama s lancem ili drugim alatima za sječu i obradu drveća.



Slika 5.46. Harvesteri John Deer - s točkovima i hodajući (www.deere.com)

5.7.2. Konstrukcijske karakteristike harvestera

Harvesteri imaju robusnu šasiju koja može biti s točkovima, gusjenicama ili polugusjenicama. Pogonski sistem obuhvata motor i transmisiju, kombinovane sa hidrauličkim sistemima za preciznu kontrolu. Radni alati uključuju harvesterske glave i kranove, omogućavajući sječu, kresanje i prerezivanje stabala na željene dužine (Slika 5.47).



Slika 5.47. Glavni dijelovi harvester-a šestotočkaša: *1. Motor, 2. Kabina, 3. Točak na zadnjoj osovini, 4. Zadnji okvir, 5. Prednji okvir, 6. Točak na prednjoj osovini, 7. Boogie osovina, 8. Hidraulična dizalica, 9. Rotator, 10. Harvesterska glava, 11. Radna hidraulika hidraulične dizalice.*

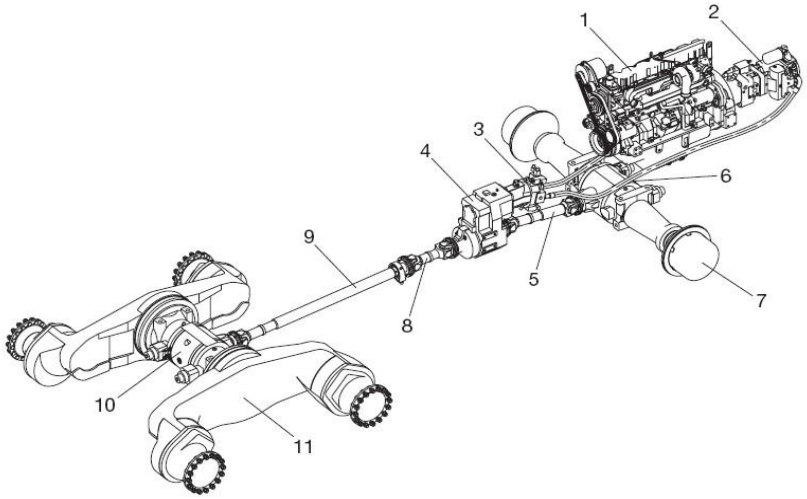
5.7.2.1. Transmisija i pogon

Harvesteri koriste različite vrste transmisije kako bi se osigurala distribucija snage od motora do pogonskih sklopova (Boellehuus, 1992; Bystrický et al., 2011). Vrste transmisije koje se koriste u harvesterima su:

- Mehanička transmisija - koristi mehaničke komponente, poput zupčanika, osovina i kvačila za prenos snage s motora na pogonske sklopove. Mehanička transmisija je robusna ali je manje fleksibilna u pogledu promjena brzine i prilagođavanja različitim terenskim uslovima, tako da se u savremenim harvesterima rijetko koristi.
- Hidrostatska transmisija - koristi hidraulične pumpe i motore za prenos snage. Ovaj sistem omogućava glatko i kontinuirano prilagođavanje brzine i snage, što je posebno korisno u izvođenju radova u šumarstvu gdje su potrebne česte promjene u brzini kretanja i opterećenju kao i manevrisanje i rad u teškim terenskim uslovima (Singh et al., 2013).
- Hidrostatsko-mehanička transmisija - kombinuje elemente mehaničke i hidrostatske transmisije kako bi se iskoristile prednosti oba sistema. Ovaj tip transmisije koristi mehaničke komponente za osnovni prenos snage i hidrauličke komponente za finu kontrolu i prilagođavanje brzine (Legner et al., 2016).
- Električna transmisija - koristi elektromotore za prenos snage. Ovaj tip transmisije je manje uobičajen u šumskim harvesterima, ali se koristi u nekim modernim dizajnima koji teže smanjenju emisija i poboljšanju energetske efikasnosti. Električna transmisija omogućava preciznu kontrolu i može smanjiti potrebu za kompleksnim mehaničkim i hidrauličkim sistemima.
- Harvesteri na hibridni pogon - obično koriste kombinaciju mehaničke i električne transmisije kako bi iskoristili prednosti oba sistema, omogućavajući veću energetsku efikasnost, smanjenje emisija i poboljšanu kontrolu nad mašinom (Mergl et al., 2021).

Ovi sistemi uključuju električne motore i generatore koji direktno pogone točkove ili gusjenice, pružajući visok obrtni moment pri niskim brzinama. Mehanička transmisija prenosi snagu iz električnog motora na pogonske sklopove, omogućavajući stabilan i efikasan prenos snage. Baterijski sistemi skladište električnu energiju za napajanje električnih motora, omogućavajući regeneraciju energije pri kočenju ili smanjenju opterećenja. Kontrolni sistemi upravljaju radom mehaničkih, električnih i hidrauličkih komponenti, osiguravajući optimalnu efikasnost i performanse. Ova kombinacija omogućava hibridnim harvesterima visoku efikasnost, smanjene emisije štetnih gasova i poboljšanu fleksibilnost u različitim radnim uslovima.

Harvesteri najčešće koriste hidrostatsko-mehaničku transmisiju čije su glavne prednosti brzo razdvajanje primarnog pogona i izlaznih uređaja, zatim mogućnost prenosa velikog obrtnog momenta pri malim brzinama, bez rizika od kvarova zbog preopterećenja sistema. Hidrostatsko-mehanička transmisija se sastoji od hidrostatskih i mehaničkih dijelova (Slika 5.48). Kod harvestera točkaša mehanički dio se sastoji od mjenjača, seta osovina, diferencijala i pogonskih osovina. Hidrostatski dio čini zatvoren sistem hidraulične pumpe i hidrauličnih (hidro) motora. Pumpa se pokreće preko elektronski kontrolisanih ventila. Pravac kretanja i pritisak ulja u sistemu pokreće harvester i njegove agregate u željenom pravcu.

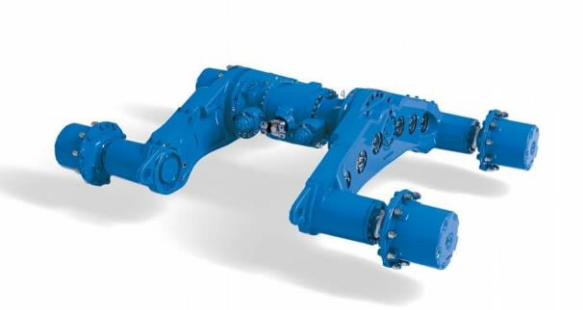


1. Motor
2. Hidraulična pumpa
3. Hidro motor
4. Mjenjač
5. Zglobno vratilo, zadnji diferencijal
6. Zadnji diferencijal
7. Glavčina
8. Centralno zglobno vratilo
9. Zglobno vratilo, centralni - prednji diferencijal
10. Prednji diferencijal
11. Kućište tandem osovina

Slika 5.48. Hidrostatsko-mehanička transmisija kod harvestera sa jednim centralnim hidrauličnim motorom

Najrasprostranjenije dizajnersko rešenje kod harvestera sa točkovima je sistem prenosa pogonske sile sa jednim centralnim hidrauličnim motorom aksijalnog tipa. Proizvođači podvozja za hodajuće harvestere koriste sistem prenosa sa hidrauličnim motorom u svakom točku. Proizvođači harvestera gusjeničara koriste sistem prenosa pogonske sile sa hidrauličnim motorom u svakoj gusjenici (traci).

Harvesteri sa točkovima imaju podvozje sa četiri, šest ili osam točkova sa zglobnim ramom. Ram harvestera točkaša se sastoji od prednjeg i zadnjeg dijela, pri čemu su oba povezana sa centralnom spojnicom. Međusobno kretanje oba dijela rama se odvija pomoću dva hidraulična cilindra sa maksimalnim uglom zakretanja od oko 45°. Podvozja sa četiri točka su opremljena sa dvije fiksne osovine ili rjeđe sa dvije zakretne osovine. Podvozja sa šest točkova su opremljena jednom tandem osovinom u prednjem dijelu i jednom fiksnom osovinom u zadnjem dijelu (Slike 5.49 i 5.50). Podvozja sa osam točkova su opremljena sa dvije tandem (dvostruke ili obrtne) osovine. U poređenju sa fiksnim osovinama, prednost tandem osovina je lakše savladavanje prepreka na terenu i manji pritisak podvozja mašine na podlogu. Prednost fiksnih osovina su manji konstrukcioni gabariti, niži troškovi proizvodnje i veća ekonomičnost rada. Vertikalni udar kabine kod mašine sa fiksnom osovinom je veći pri udaru u prepreku lijevim ili desnim dijelom osovine u poređenju sa tandem osovinama. Osovine koje se okreću omogućavaju nezavisno skretanje svakog točka, što omogućava balansiranje mašine u uzdužnom i poprečnom smijeru na teškim terenima. Pristupni nagib harvestera je do 30%, a u poprečnom pravcu do 60%. Prema uslovima terena, indikativne vrijednosti pristupnog nagiba harvestera sa četiri točka sa standardnim fiksnim osovinama su maksimalno 15% u uzdužnom i 40% u poprečnom pravcu. Moderni sistemi, poput kabl-asistiranih mašina, omogućavaju efikasan pristup i rad harvestera na nagibima do 85% (Visser i Stampfer, 2015)





Slika 5.49. Tandem osovina NAF TAP 54 (www.nafaxles.com) Slika 5.50. Fiksna osovina NAF SAP 87 (www.nafaxles.com)

Na ramu hodajućeg harvestera, svaki točak (noga) je na nezavisnoj ruci koja je podesiva vertikalno i horizontalno, nezavisno od drugih. Ovo rješenje suštinski poboljšava manevarske sposobnosti mašine na teškim terenima kao i mogućnost savladavanja nagiba. Podvozje harvestera sa gusjenicama je opremljeno jednim čvrstim okvirom; mašina se okreće usporavanjem ili zaustavljanjem rotacije jedne ili druge gusjenice.

Harvesteri na točkovima mogu biti opremljeni širokim spektrom pneumatika radijalnog i dijagonalnog dizajna, sa ili bez unutrašnje gume. Širina guma za harvester je obično od 400 do 800 mm, za prečnike felni od 15,52" do 34". Pneumatici za rad u šumi imaju specijalno ojačanu strukturu za rad u teškim uslovima. Druge vrste guma (npr. poljoprivredne) se ne mogu koristiti bez povećanja rizika od pucanja.

Specifični pritisak pneumatika na podlogu (zemljište) teoretski bi trebao odgovarati pritisku unutar pneumatika, ali na njega utiče faktor krutosti pneumatika. Kako bi se izbjegla šteta na šumskom zemljištu, pritisak otiska pneumatika mora se smanjiti na nivo koji odgovara nosivosti zemljišta.

Pritisak mašine na zemljište može se smanjiti na nekoliko načina, pri čemu se većina odnosi na modifikacije podvozja, osim smanjenja ukupne težine mašine. Jedan od načina za smanjenje pritiska je povećanje kontaktne površine sa podlogom, što se može postići povećanjem broja točkova, povećanjem dimenzija točkova ili promjenom tipa pneumatika. Druga mogućnost je redizajn pogonskog mehanizma, poput ugradnje hidrauličnog podizanja točkova ili okretne osovine. Ključno za smanjenje otpora kotrljanja na mekom terenu je stvaranje plitkog otiska, što kod pneumatika može biti postignuto nižim pritiskom vazduha.

Pri datoj vrijednosti pogonske sile, prijanjanje za podlogu zavisi, kako od stanja i vrste podloge, tj. od mehaničkih svojstava zemljišta, tako i od vrste i konstrukcionih parametara pogona i podvozja. Pored toga, zavisi i od adhezivnog opterećenja podvozja, koje zavisi od težine mašine, raspodjele opterećenja na osovine, kao i od veličine gusjenica ili veličine i naduvavanja pneumatika.

Postoje i harvesteri gusjeničari koji, zahvaljujući gusjenicama, imaju bolju stabilnost i trakciju u poređenju sa klasičnim, što im omogućava efikasan rad na mekim, močvarnim ili strmim terenima. Postoje modeli koji su izvorno dizajnirani kao gusjeničari, dok se neki dobijaju prilagođavanjem građevinskih mašina.



a b c

Slika 5.51. Različite koncepcije harvestera gusjeničara: a - 4x4, b - originalno gusjeničar, c - na osnovi bagera (www.valuation.lectura.de), (www.deere.com), (www.volvoce.com)

Točkovi opremljeni trakastim gusjenicama su korisni u teškim terenskim uslovima, posebno na zemljištima sa slabom nosivošću ili u dubokom snijegu. Trakaste gusjenice pružaju zaštitu gumama od habanja, povećavaju vučnu silu i značajno smanjuju pritisak na površinu tla.

Osim gusjenica za tandem osovinu, dostupni su i točkovi sa gusjenicom ili lancem za pojedinačne točkove na fiksnoj osovini. Lanci protiv proklizavanja se koriste na blatnjavim i kamenitim terenima; štite gume i omogućavaju bolji prenos vučne sile na terenu.

Na nagnutim terenima, stabilnost mašine se može poboljšati povećanjem njene težine dodavanjem antifriza u gume. Gume su napunjene smješom do 75% zapremine. Na ovaj način se npr. kod guma dimenzija 700 x 26,5 može povećati masa mašine za 470 kg po gumi. U tandem osovini opremljenoj ovim gumama, težina mašine se povećava za 1.880 kg.

Harvesteri su obično opremljeni četverocilindričnim ili šestocilindričnim dizel motorima snage između 50 i 250 kW, sa zapreminom od 2,5 do 9 litara. Od 2012. godine, svi motori sa snagom većom od 56 kW morali su ispunjavati evropski standard za emisiju Stage IIIB (EPA privremeni TIER 4). Od 2014. godine, standard je postao strožiji, zahtijevajući da svi motori sa snagom većom od 56 kW budu usklađeni sa standardom EU Stage IV (EPA Tier IV). U 2020. godini uveden je standard emisije Stage V. Proizvođači koriste dvije metode, ili njihovu kombinaciju, da bi ispunili ove zahtjeve za smanjenje emisije štetnih gasova. Prva metoda uključuje tehnologiju recirkulacije i hlađenja izduvnih gasova (CEGR+DPF). Motori sa ovom tehnologijom imaju nešto veću potrošnju goriva, a filter čvrstih čestica zahtijeva regeneraciju jednom dnevno u trajanju od oko 30 minuta i zamjenu nakon otprilike 6000 radnih sati, što predstavlja značajan trošak. Druga metoda je tehnologija selektivne katalitičke redukcije (SCR), gdje mašine koriste poseban rezervoar za AdBlue aditiv, što zahtijeva složenije prostorno rješenje za motor.

5.7.2.2. Kabina operatera

Tehnički i bezbjednosni parametri kabine, dizajn radnog prostora, raspored komandi i ergonomske karakteristike direktno utiču na učinkovitost operatera i kvalitet obavljenog posla. Zdravstveno stanje radnika može uticati na kvalitet rada i produktivnost. Odsustvo zbog zdravstvenih problema može rezultovati povećanim troškovima rada (Ghaffariyan, 2016). Stoga je važno uzeti u obzir sigurnost kabine harvestera, jer operateri provode duge periode u njima (Ghaffariyan, 2022). Kabine harvestera mogu biti fiksne, okretne ili okretne sa funkcijom balansiranja položaja. U fiksnim kabinama, operater podešava svoj radni položaj okretanjem ili balansiranjem sjedišta. Okretne kabine uglavnom imaju ograničen raspon rotacije, koji se kreće od 90° do 320°, dok balansiranje položaja omogućava naginjanje u četiri smjera, do 20° u svakom pravcu, zavisno od dizajna proizvođača. Radna svjetla su obično postavljena na gornji spoljašnji dio kabine, a mogu biti ugrađena i ispod kabine ili na glavnu ruku hidraulične dizalice. Standardno, većina proizvođača koristi halogena svjetla, dok su ksenonska ili LED svjetla dostupna kao opcija.

Funkcije harvestera kao što je rukovanje hidrauličnom rukom i harvesterskom glavom kontrolišu dvije poluge koje se nalaze na lijevom i desnom naslonu za ruke sjedišta. U blizini mini poluga nalaze se i drugi kontroleri u vidu tastera potrebnih operateru za rad. Displej mjerno-kontrolnog sistema kontroliše se ili tastaturom i mišem ili dodirom. Ostali kontroleri u vidu prekidača i tastera (klima, nezavisno grijanje ili brisači) nalaze se na bočnim panelima u kabini ili na plafonu kabine. Kabine su opremljene raznim sigurnosnim elementima. Osnovni elementi uključuju dugme za hitne slučajeve koje zaustavlja mašinu i sve njene funkcije, aktivira parkirnu kočnicu kada operater pokrene sistem. Dodatni sigurnosni elementi uključuju centralno alarmno svjetlo i zujalicu u plafonu kabine, koja signalizira kvar, kao i sigurnosni prekidač na vratima koji sprečava rad mašine dok vrata kabine nisu zatvorena. Prema važećim propisima, operatersko sjedište mora biti opremljeno sigurnosnim pojasom. Kamera za vožnju unazad je još jedan sigurnosni element, a njena slika se prikazuje na displeju

unutar kabine. Svaka kabina, u skladu s propisima, mora imati izlaz za hitne slučajeve koji omogućava pristup kabini spolja (Slika 5.52).



Slika 5.52. Kabina harvestera John Deere 1270E

5.7.2.3. Hidraulična dizalica i sječna glava

5.7.2.3.1. Hidraulična dizalica

Hidraulična dizalica je zglobni hidraulični mehanizam koji na vrhu nosi sječnu glavu (harvestersku glavu) ili hvataljku. Nosivost hidraulične dizalice se izražava u kilonjutnmetrima. Moment dizanja (nosivost) se dobija kao proizvod dužine kraka u metrima i snage dizanja (za određenu dužinu kraka) u kN (Bystrický et al., 2011).
Prema ukupnom momentu dizanja, hidraulične dizalice se klasifikuju na sljedeći način :

- Male - sa kapacitetom dizanja do 40 knm,
- Srednje - sa kapacitetom dizanja oko 100 knm,
- Velike - sa kapacitetom dizanja oko 160 knm.

Položaj hidrauličnih dizalica na modernim harvesterima može biti:

- Sa strane kabine vozača (npr. Caterpillar, ecolog),
- Ispred kabine, na prednjoj osovini (npr. Rottne, john deere, ponsse).

Harvesteri su opremljeni visokospecijalizovanim dizalicama koje omogućavaju produžen dohvat i precizno manevrisanje hidrauličnom rukom. Ove dizalice nude funkcije kao što su nagib i produženje, uz dodatne tehnologije koje ih čine specifičnim za upotrebu u šumarstvu. Glavna svrha hidrauličnih ruku je povećanje dosega mašine, omogućavajući operateru da dohvati drvo bez potrebe da mašina prilazi svakom pojedinačnom drvetu. Na harvesterima se koriste dva osnovna tipa dizalica: teleskopske dizalice i dizalice s paralelnom granom.

Teleskopska dizalica se sastoji od više segmenata koji se međusobno uvlače i izvlače, omogućavajući promjenu dužine grane u skladu sa zahtjevima operacija. Ovaj tip grane omogućava veliku fleksibilnost u radu jer se dužina može prilagoditi teretu i prostoru u kojem

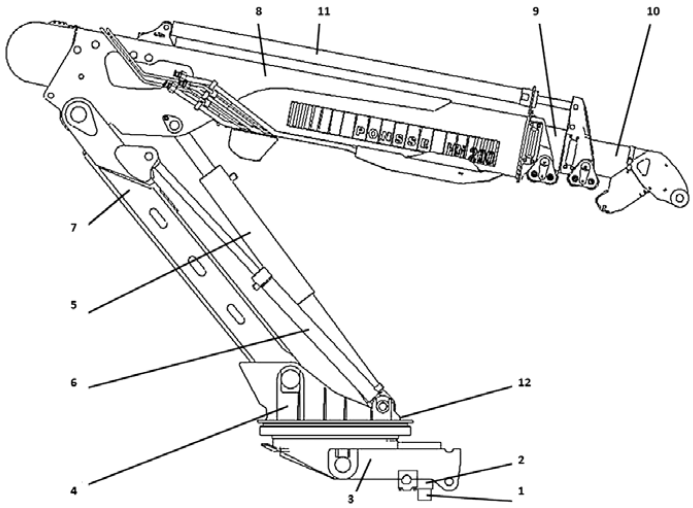
se manipuliše. Teleskopska grana omogućava veću radnu visinu i domet, bez potrebe za povećanjem ukupnih dimenzija dizalice. Time se smanjuje potreba za premještanjem vozila ili dizalice, čime se poboljšava efikasnost rada u ograničenim prostorima. S druge strane, ova tehnologija zahtijeva preciznu kontrolu hidrauličnih sistema kako bi se osigurala stabilnost i sigurnost tokom rada, posebno pri rukovanju težim teretima na većim visinama.
Paralelna grana, za razliku od teleskopske, dizajnirana je tako da zadrži konstantan položaj tereta u odnosu na osnovu dizalice tokom podizanja ili spuštanja. Ovaj mehanizam omogućava precizno pozicioniranje tereta, jer se teret kreće po paralelnoj putanji u odnosu na vozilo ili osnovu dizalice. Takav dizajn je izuzetno koristan u operacijama gdje je stabilnost tereta od ključne važnosti. Prednost paralelne grane leži u jednostavnosti upravljanja i manjem riziku od rotacije tereta tokom rada, čime se povećava sigurnost operacije. Međutim, za razliku od teleskopske grane, paralelna grana ne nudi istu fleksibilnost u smislu promjene radnog dometa (Slike 5.53 i 5.54).





Slika 5.53. Ponsee C6 teleskopska dizalica (www.ponsee.com) Slika 5.54. Cranab HC185 paralelna dizalica (www.cranab.com)

Domet hidrauličnih ruku harvestera varira i kreće se od 5 do 12 metara, u zavisnosti od modela mašine i specifičnih potreba rada. Položaj hidraulične ruke može biti automatski izbalansiran putem sistema kontrole ili uz pomoć komandi rukovaoca, što pomaže u održavanju optimalnih radnih performansi i stabilnosti mašine, naročito na terenima sa nagibima. Druga ključna funkcija je mogućnost obaranja hidraulične ruke, koja značajno doprinosi radnom komforu operatera. Obaranje ruke smanjuje opterećenje kojem je hidraulična ruka izložena tokom rada, čime se produžava njen radni vijek i smanjuje mogućnost kvara. Ova funkcija također doprinosi efikasnijem radu u skučenim prostorima ili prilikom transporta.



Slika 5.55. HN200 hidraulična dizalica. *1. Rotacioni motor, 2. Planetarni zupčanik, 3. Osnova, donji dio, 4. Osnova, gornji dio, 5. Cilindar za podizanje, 6. Cilindri za nagib stuba (2 kom), 7. Stub, 8. Glavni krak, 9. Produžetak br. 1, 10. Produžetak br. 2, 11. Cilindar produžetka, 12. Cilindar za nagib (Izvor: Ponnse Oyj)*

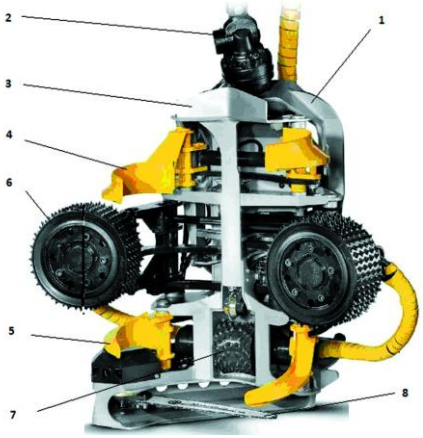
5.7.2.3.2. Sječna glava

Glavne funkcije harvesterske glave su sječa, obaranje, poprečno presijecanje, kresanje grana mjerenje i slaganje drveta. Prilikom sječe rukovaoc hidrauličkom dizalicom postavlja glavu vertikalno na podnožje drveta. Drvo je stegnuto zatvaranjem noževa i valjaka za pomjeranje drveta, a testera odsjeca drvo. Drvo se provlači kroz noževe za kresanje u horizontalnom položaju pomoću valjaka za pomjeranje i poprečno siječe od strane operatera prema uputstvima iz mjernog sistema harvestera ili prema vlastitoj odluci.

Harvesterska glava je pokretno povezana sa hidrauličnom dizalicom pomoću kvačila i rotatora. Rezni mehanizam harvesterske glave najčešće koristi princip vodilice sa lancem, kao kod motorne testere. Dostupna su i rješenja sa jednim ili dva noža za sječenje ili sječivom kružne testere. Uređaj za sječenje sa vodilicom može biti opremljen sistemom označavanja bojom koji omogućava operateru harvestera da razlikuje nekoliko sortimenata slične veličine ili klase. Vodilica može biti opremljena i sistemom za tretiranje panjeva protiv truleži supstancama na bazi uree i biološkim alternativama na bazi specifičnih gljiva.

Najčešće korišćeni tip mehanizma za pokretanje drveta kroz harvestersku glavu predstavljaju valjci ili trake (remenje). Glava može imati dva, tri ili četiri dovodna valjka koji imaju dva osnovna tipa konstrukcije. Prvi tip su potpuno metalni valjci sa čeličnim šiljcima ili rebrima različitih oblika. Drugi tip su kombinovani valjci sa gumom i lancima ili čeličnim šiljcima. Glave harvestera sa četiri dovodna valjka i kraćim osnovnim okvirom su pogodne za rad i sa ravnim i sa krivim deblima. Zahvaljujući kraćem okviru i četiri valjka za hranjenje, oni mogu bolje pratiti nepravilnosti na stablima. Harvesterska glava ima fiksne ili pokretne noževe za kresanje čiji je ukupan broj obično 4 ili 6. Kvalitet kresanja debla zavisi od geometrije noževa, od pritiska i naoštrenosti (Slika 5.56).

Uređaj za mjerenje dužine debla radi na principu mjernog točka sa oprugom ili hidrauličnim pritiskom. Prečnik trupaca se mjeri na osnovu otvora gornjih noževa za kresanje grana ili dovodnih valjaka. Takođe, može se postaviti dužina koja se koristi za automatsko prerezivanje stabla prema unaprijed definisanoj dužini. Softverski, računar može predvidjeti veličinu svakog debla na osnovu prethodno posječenih stabala, što optimizuje proces i izbor stabala. Harvesterska glava može biti opremljena i uređajem za zahvat više stabala u jednom radnom ciklusu. Ovaj princip se koristi posebno za proredne sječe ili sječu drveta u energetske svrhe.



Slika 5.56. KESLA 30RH harvesterska glava - *1. Fiksni okvir glave, 2. Rotator, 3. Fiksni nož za kresanje, 4. Prednji noževi za kresnje, 5. Zadnji noževi za kresanje 6. Dovodni valjci, 7. Točak za mjerenje dužine, 8. Vodilica za prerezivanje.*

Sve ovo kontroliše operater koji sjedi u kabini mašine. Računar pojednostavljuje mehaničke prenose i prati propisanu dužinu i prečnik posječenih stabala. Masa harvesterskih glava varira od najlakših, čija je masa obično oko 450 kg, do najtežih, čija masa iznosi oko 5.000 kg. Maksimalni prečnici posječenih stabala kreću se između 25 i 90 cm. Broj fiksnih noževa je 1-2, dok broj fleksibilnih noževa varira od 2 do 6. Broj cilindara za hranjenje pri kresanju grana obično je od 2 do 4.

Na harvesterskoj glavi mogu se razlikovati sljedeći mehanizmi:

- Mehanizam za sječenje (rezanje),
- Mehanizam za kresanje grana,
- Mehanizam za hranjenje,
- Mehanizam za mjerenje,
- Mehanizam za utovar i istovar.

Mehanizam za sječenje - siječe stabla i usmjerava ih u željeni pravac. Sadrži sljedeće dijelove:

- Mehanizam za podrezivanje – njegova uloga je da posiječe stablo pri njegovoj osnovi. Razlikuju se mehanizmi koji stvaraju piljenivu (lančana ili kružna testera) i mehanizam koji ne stvaraju piljevinu (nož za sječenje).
- Mehanizam za usmjeravanje – njegova uloga je da usmjeri posječeno stablo u željeni smijer pada, ili ga direktno prenese na mjesto polaganja i tamo ga položi.

Mehanizam za kresanje grana - uklanja grane sa stabla. Na većini šumskih mašina za sječu i transport nalazimo mehanizme za kresanje na bazi noževa. U osnovi, to su noževi hiperboličnog oblika, smješteni u glavi mašine ili na teleskopskom kraku. Većina harvesterskih glava ima jedan fiksni nož i dva pokretna noža. Stablo koje se kreše prolazi između noževa, pri čemu se grane odsijecaju.
Noževi trebaju biti sposobni da što preciznije prate oblik stabla. Postoje sljedeće konstrukcije noževa za obrezivanje:

- Oblik linije rezanja (sječiva) noža je paraboličan ili kružan.
- Oblik poprečnog profila noža:
  a. Jednostruki noževi za kresanje - ravni; nož s držačem; rasterećujući nož; rasterećujući nož s držačem; jednoobrazno zakrivljeni nož za kresanje.
  b. Dvostruki noževi za kresanje - ravni ili zakrivljeni (Mrenica, 2005).

Mehanizam za hranjenje - omogućava pomjeranje posječenog stabla između pojedinačnih radnih mehanizama. Najčešći mehanizmi za hranjenje su cilindri. Oni obično uključuju dva cilindra, ravnomjerno udaljena jedan od drugog, koja su pritisnuta uz deblo pomoću linearnih hidromotora. Ovi cilindri mogu razviti visoku snagu.

Podjela cilindara prema konstrukciji je sljedeća:

- Čelični cilindri sa šiljcima:
  a. Čelični cilindri sa željeznim segmentima
  b. Čelični cilindri sa šiljcima
  c. Čelični cilindri sa šiljcima na pokretnim pločama

- Gumirani čelični cilindri:
  a. Čelični cilindri sa šiljcima na pokretnim pločama
  b. Sa konkavnim lancima
  c. Sa lancima postavljenim paralelno sa osovinom cilindra

- Cilindri sa gumama:
  a. Sa lancima
  b. Bez lanaca – rijetko se koriste kod harvestera

- Elementi za hranjenje u obliku:
  a. Šiljci: eliptični, konusni, evolventni
  b. Oštrih ivica.

U zadnje vrijeme proizvođači su češće harvesterske glave sa više cilindara za hranjenje umjesto tradicionalnog para. Oni omogućavaju snažniji hvat stabla, a pritisak se smanjuje na noževa, što omogućuje da se noževi fokusiraju isključivo na kreanje grana i rade pod manjim

pritiskom. Glave sa četiri cilindra (finski tip glava) imaju kompaktniju konstrukciju i bolje prate oblik stabla. Njihova manja težina također omogućava lakšu manipulaciju hidrauličnom rukom u gustim šumskim staništima, što ih čini pogodnim za rad u šumama crnogoričnog i bjelogoričnog drveća. Glave sa dva cilindra (švedski tip glava) imaju robusniju konstrukciju, duži osnovni okvir, i za pomjeranje stabla koriste dva cilindra koja imaju veću snagu. Ovaj tip glava je posebno pogodan za rad sa dugim, ravnim stablima sa minimalnim brojem neravnina. To znači da se ove glave najbolje primjenjuju u crnogoričnim šumama.

Mehanizam za mjerenje - automatski obavljaju mjerenje dužine i zapremine obrađenog drveta. Uređaj može mjeriti cijela stabla, kao i pojedinačne sortimente. Mjerenje veličine drveta može se vršiti mehanički, elektromehanički ili hidromehanički.
Savremeni harvesteri opremljeni su automatskim sistemom za mjerenje dužine i prečnika obrađenih stabala. Za mjerenje dužine koristi se zupčanik smješten u glavi, koji prati površinu stabla tokom njegovog pomjeranja. Na osnovu broja okretaja zupčanika izračunava dužinu. Prečnik se izračunava na osnovu veličine otvaranja donjih noževa za kresanje koji obuhvataju stablo. Mjerenje se vrši pomoću potenciometra smještenog u priključnim krakovima noževa. Sistemi za mjerenje i procjenu mogu izračunati zapreminu, sortirati prema vrsti drveta, klasi prečnika, dužini i kvalitetu. Podaci se bilježe u računaru harvestera i mogu se kasnije koristiti za dalju obradu.

5.7.2.4. Pomoćni alati harvestera

Harvesteri kao pomoćni uređaj često koriste vučna vitla. Vučna vitla omogućavaju rad harvestera ili forvardera na zahtjevnim terenima ili strmim nagibima, u slučajevima kada vučna sila pogonske mašine, koja se prenosi putem točkova na teren, nije dovoljna za kretanje ili zaustavljanje (Slika 5.57). Vučna vitla sprečavaju oštećenje tla i korijena drveća usljed proklizavanja točkova, čime se povećava sigurnost rada. Brzina namotavanja užeta vitla sinhronizovana je sa kretanjem mašine, osiguravajući stabilnost. Dužina užeta vučnih vitla obično varira između 250 i 400 metara. Vitlo se može kontrolisati iz kabine mašine ili daljinskim upravljačem. Neki proizvođači nude vučna vitla koja su primjenljiva i za privlačenje drveta, čime se dodatno poboljšava njihova funkcionalnost u šumskim operacijama.



Slika 5.57. Trakciono vitlo T-Winch 10.3 u radu s harvesterom

Pored vitla, harvester je opremljen i mnogim drugim uređajima koji pomažu i olakšavaju rad. Neki od njih su:

- Nezavisno grijanje za zagrijavanje motora, hidrauličnog ulja i kabine prije starta. Svojom aktivnošću smanjuje potrošnju goriva, habanje dizel motora i ostalih komponenti,
- Centralno podmazivanje koje poboljšava kvalitet održavanja i smanjuje utrošeno vrijeme potrebno za ovu svakodnevnu aktivnost,
- Električna pumpa hidrauličkog ulja i goriva smanjuje rizik od zagađenja ovih radnih fluida, ako se pumpa eksternom pumpom i smanjuje vrijeme potrebno za servisiranje mašine,
- Hidraulični ventilator sa reverzibilnim radom smanjuje buku i potrošnju goriva,
- Automatski sistem za gašenje požara doprinosi jačanju zaštite od požara na mašini.

5.7.3. Mjerni i kontrolni sistemi harvestera i ostali softveri

Harvesteri su sofisticirane mašine koje kombinuju mehaničke, hidraulične, električne i računarske komponente. Efikasna integracija ovih pojedinačnih elemenata ne bi bila moguća bez visokokvalitetnog sistema upravljanja. Struktura sistema upravljanja bazirana je na CAN (eng. Controller Area Network) tehnologiji i distribuiranoj kontroli. Pojedinačni, nezavisni upravljački moduli harvestera, poput kontrolne jedinice motora, modula harvesterske glave, modula hidraulične ruke i drugih, međusobno komuniciraju putem CAN magistrale. Ova tehnologija omogućava stvaranje organizovane modularne strukture i omogućava multifunkcionalnu dijagnostiku u različitim radnim uslovima.

Mjerni sistem harvestera analizira podatke dobijene sa senzora na harvesterskoj glavi, podatke koje unosi operater tokom proizvodnje, kao i podatke iz cjenovnika koji se pohranjuju u računar mašine (Slika 5.58). Na osnovu tih podataka sistem predlaže optimalnu strukturu sortimenata za postizanje maksimalnog iskorišćenja obrađivanog stabla ili prilagođava sortimente u skladu sa zahtjevima ugovora s kupcem. Cjenovnik je datoteka koja sadrži informacije o potrebnim parametrima proizvodnje, kao što su vrste drveća, dimenzije pojedinačnih sortimenata i njihova relativna ili realna vrijednost.

Mjerno-regulacioni sistemi funkcionišu u dva režima: režimu rada i režimu podešavanja. U režimu rada, operater ima pristup aktuelnim informacijama o trenutnoj sječi, uključujući dužinu i prečnik trupaca, klasifikaciju sortimenata ili predviđanje strukture sortimenata. Takođe, dostupni su podaci o funkcionalnim parametrima mašine, kao što su temperatura hidrauličnog ulja, količina goriva ili broj obrtaja motora. U režimu podešavanja, operater unosi identifikacione podatke o sastojini i svoje lične podatke, bira izvještaje o proizvodnji, unosi parametre za proizvodnju, vrši kalibraciju sistema mjerenja i dijagnostike, te podešava funkcionalne parametre mašine.

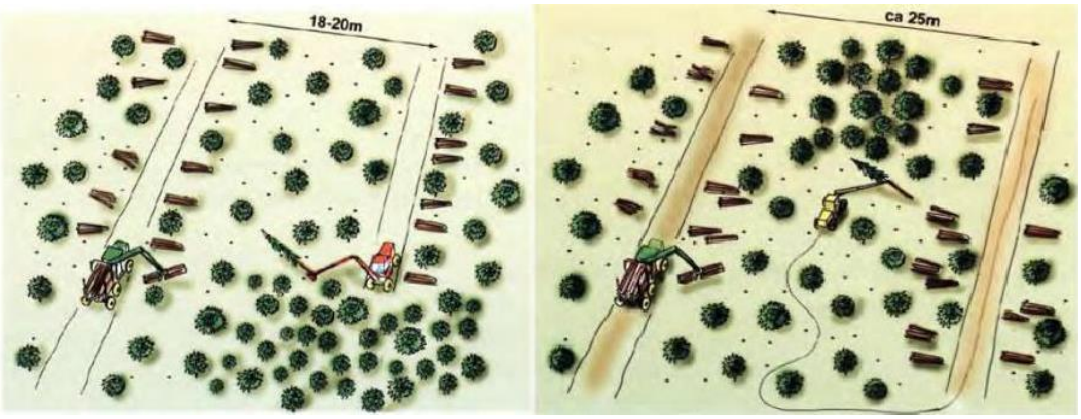


Slika 5.58. Sistem za mjerenje Timbermatic H-12

Harvesteri primjenjuju principe telematike, koja je tehnološka disciplina koja se bavi kombinacijom prenosa i obrade podataka sa drugim slikovnim i drugim komunikacionim sistemima i sredstvima. Ovo je način na koji vlasnik mašine može da šalje ili prima podatke koji se odnose na operativne karakteristike harvestera preko sopstvenog komunikacionog uređaja ili na daljinu. Harvesteri su dodatno opremljeni globalnim sistemom pozicioniranja (GPS) za povećanje efikasnosti rada, ekoloških parametara i praćenja uređenja radne lokacije. GPS služi za određivanje položaja, brzine kretanja i tačnog vremena pomoću sistema satelita na Zemljinoj orbiti. Ovaj sistem satelita može da obezbijedi kontinuirano pokrivanje skoro cele Zemljine površine navigacionim signalima pomoću kojih korisnici GPS prijemnika imaju mogućnost da utvrde položaj skoro bilo gdje na Zemlji.

Zajedno sa GPS sistemima, postoje i računari visokih performansi koji su integrisani u mašine za sječu i transport drveta, što omogućava opremanje ovih mašina naprednim geografskim informacionim sistemima (GIS) koji omogućavaju bolje praćenje kretanja drvnih sortimenata u logistički lanac prerade drveta u saradnji sa sistemima proizvodnje i upravljanja harvesterom i GPS-om.

Harvesteri imaju višestruko veću produktivnost u odnosu na sjekače. Kod čistih sječa, harvesteri se kreću po cijeloj sječini i nije potrebna izgradnja posebne infrastrukture. Nasuprot tome, kod svih drugih vrsta sječa potrebno je projektovati i izgraditi određenu infrastrukturu (Slika 5.59) Uobičajeno, to su trase (vlake) širine do 4 metra po kojima se harvester kreće. Grane koje ostaju nakon obrade postavljaju se na trasu kako bi harvester prelazio preko njih, čime se smanjuje oštećenje zemljišta. Nakon takve sječe nije potrebna posebna uspostava šumskog reda (Krpan i Poršinsky, 2001). Razmaci između trasa obično iznose do 20 metara, što predstavlja optimalnu udaljenost u kojoj harvester može dohvatiti stablo hidrauličnom rukom, a da pri tom ne silazi s trase.



Slika 5.59. Šematski prikaz rada harvestera i forvardera (Krpan i Poršinsky, 2004)

5.8. Harvarder

Harvarderi su relativno nova tehnologija u šumarstvu, koja kombinuje funkcije harvestera i forvardera u jednoj mašini. Ovaj jedinstveni sistem omogućava operateru da u jednom zahvatu da obavi sječu, obradu i transport drveta, čime se smanjuje potreba za korišćenjem dvije mašine. Harvarderi predstavljaju evoluciju u šumarskoj industriji koja je motivisana potrebom za smanjenjem troškova i poboljšanjem efikasnosti. Ove mašine su prvobitno razvijene za prorjeđivanje i obradu manjih stabala, ali su kasnije adaptirane i za završne sječe većih stabala. Harvarderi funkcionišu tako što kombinuju sječnu glavu harvestera, koja služi za obaranje i obradu stabala, sa sposobnošću forvardera da transportuje trupce na određenu lokaciju. Ova kombinacija omogućava efikasnije radove na terenima gdje bi korišćenje dvije mašine bilo skuplje ili nepraktično.

Harvarderi se koriste u situacijama gdje postoje specifični uslovi koji favorizuju ovakvu vrstu tehnologije. To su najčešće manje šumske parcele, manja stabla, kratke udaljenosti za transport i situacije gdje postoji ograničen broj sortimenata drveta. Prema istraživanjima, kao što su ona u Švedskoj (Jonsson et al., 2023), harvarderi mogu značajno smanjiti ukupne troškove, naročito gdje su manja stabla dominantna. U istraživanjima se navodi da bi uvođenje harvardera moglo smanjiti troškove do 3%, a da bi za to bilo potrebno uvesti do 250 harvardera u postojeće flote šumarskih mašina.

Najveća prednost harvardera je njihova sposobnost da kombinuju funkcije dvije mašine u jednoj, čime se smanjuju operativni troškovi, broj mašina i radnika, kao i potencijalni negativni uticaji na okolinu. Ove mašine smanjuju potrebu za izgradnjom infrastrukture na terenu jer mogu raditi na nepristupačnim područjima i smanjiti oštećenje zemljišta uzrokovano kretanjem teških mašina. Takođe, harvarderi smanjuju potrošnju goriva jer se ne moraju vraćati po sortimente, što dodatno smanjuje troškove i negativne ekološke efekte.

Međutim, harvarderi imaju svoja ograničenja. Prije svega, oni su veoma složene mašine, što ih čini skupljim za nabavku i održavanje. Pored toga, njihova primjena je najefikasnija u specifičnim uslovima, kao što su kraće udaljenosti transporta i manja zapremina stabala. U situacijama sa većim stablima ili većim udaljenostima transporta, tradicionalni dvomašinski

sistem i dalje može biti konkurentniji (Wester i Eliasson, 2003). Harvarderi su manje efikasni na dužim relacijama jer mogu prenijeti samo manje tereta nego specijalizovani forvarderi.

Anderssona i Eliassona (2004) bavili su se analizom produktivnosti harvardera tokom završnih sječa šuma. Ova studija se fokusira na to kako različiti radni metodi, a ne samo tehnička unapređenja, mogu značajno povećati produktivnost harvardera.

U ispitivanju su korištene tri metode rada:

Metod 1: Harvader vozi unazad u sječinu, siječe stabla na prosjeci, ostavlja ih na zemlji, a zatim prilikom izlaska sječe stabla sa obje strane, obrađuje i utovara ih u prostor za utovar.

Metod 2: Harvader vozi unaprijed uz rub sječine i sječe stabla s jedne strane, obrađujući ih i slažući u prostor za utovar.

Metod 3: Harvader vozi unaprijed u sječinu, sječe stabla na prosjeci i sa obje strane, obrađuje ih i stavlja u prostor za utovar.

Rezultati su pokazali da je metod 2 bio najefikasniji, s produktivnošću od 13,0 kubnih metara drveta po efektivnom radnom satu (m³ u.b./E0h), dok su metode 1 i 3 imale nešto manju produktivnost (12,1 i 11,9 m³ u.b./E0h). Razlika u efikasnosti je primarno zabilježena u fazama obrade drveta i kretanja tokom obrade.

Laitile i Asikaine (2006) istražuju produktivnost harvardera, u ranim proredama šuma s posebnim fokusom na energetsko drvo. U istraživanju je korišten konvencionalni forwarder Valmet 840 opremljen Moipu 400 E energetskom glavom, a produktivnost harvardera u radu sa sitnim drvećem sa granama iznosila je 3,3 m³ po efektivnom radnom satu, s parametrima kao što su prosječna zapremina stabla od 25 dm³, količina energije iz sječene biomase od 50 m³ po hektaru, zapremina utovara od 6,2 m³ i udaljenost transporta od 250 metara. Istraživanje je otkrilo da sječa i slaganje stabala čine najveći udio u ukupnom vremenu rada harvardera, oko 45%. Otvaranje trasa zauzelo je 18% vremena, dok je utovar posječenih stabala iznosio 17% vremena. Manji udio vremena odnosio se na transport sa i bez tereta (6% i 5%, respektivno), kao i na kretanje tokom sječe i utovara (5%).

Jedna od prednosti harvardera u odnosu na tradicionalni lanac mašina za sječu i transport (harvester-forwarder) je smanjenje troškova zbog kombinovanja dvije funkcije u jednoj mašini. Međutim, mašina je nešto skuplja u radu, jer njena cijena po satu rada može biti 30-40% viša u odnosu na konvencionalni forwarder. Dodatni izazovi uključuju potrebu za daljim tehničkim unapređenjima kako bi se povećala efikasnost i produktivnost, posebno kada se radi o optimizaciji kretanja i smanjenju nepotrebnih zaustavljanja.

Neki od poznatijih modela harvardera su Ponsse Buffalo Dual i Komatsu X19 Combi (Slika 5.60), čije tehničke karakteristike su naveden u narednoj Tabeli.

Tabela 5.14. Tehničke karakteristike Ponsse Buffalo Dual i Komatsu X19 Combi harvardera

Specifikacija	Ponsse Buffalo Dual	Komatsu X19 Combi
Motor	Mercedes-Benz, 210 kW	Komatsu 9.0 L, 185 kW
Nosivost	14.000 kg	16.000 kg
Doseg krana	10 metara	11 metara

Masa	19.500 kg	22.000 kg
Kombinacija funkcija	Harvester i forwarder	Harvester i forwarder
Tio podvozja	8 točkova	8 točkova
Radni uređaj	Ponsse H5 harvesterska glava	Komatsu C144 harvesterska glava
Dužina	8.6 metara	10.5 metara
Brzina vožnje	20 km/h	20 km/h



Slika 5.60. Harvarder Komatsu X19 Combi (Izvor: Komatsu Forest Website: YouTube Channel)

Iako trenutni modeli harvardera pokazuju potencijal za smanjenje troškova u određenim uslovima, istraživanje (Jonsson et al., 2023) sugeriše da bi tehnološki razvoj mogao dodatno poboljšati njihove performanse. Posebno se navodi uloga automatizacije, koja bi mogla smanjiti vrijeme rada i povećati produktivnost harvardera, čineći ih konkurentnijim u poređenju sa tradicionalnim sistemima. Na primjer, automatski sistemi za mjerenje i optimizaciju sječe mogu omogućiti efikasniju selekciju sortimenata drveta i bolje planiranje operacija.

5.9. Feler bančer

Feler bančer (eng. feller-buncher) je šumska mašina koja objedinjuje funkcije sječe stabala i njihovog grupisanja, omogućavajući efikasno prikupljanje tokom šumskih operacija. Ova mašina se prvenstveno koristi u metodama sječe cijelih stabala (eng. whole-tree harvesting), gdje drvo ostaje neobrađeno dok se ne preveze do stovarišta ili mjesta daljnje obrade. Feler bančer dakle omogućava efikasno grupisanje oborenih stabala na jednoj lokaciji, gdje ih dalje preuzimaju mašine poput skidera ili forvardera. Posebno je koristan u velikim šumskim operacijama, gdje brzina i logistička optimizacija imaju ključnu ulogu u smanjenju troškova i povećanju produktivnosti.

Rad Feler bančera (eng. bunching) nije nov pristup; njegov uticaj na produktivnost žičara prvi put je istražen sedamdesetih godina prošlog vijeka u SAD-u (Kellogg, 1976). Naširoko se koristio za poboljšanje procesa sječe i izvoza u plantažama i prirodnim šumama (Spinelli i Hartsough, 2000) te prilikom proreda i čistih sječa (Bergström et al., 2010).

Jedan od glavnih razloga za upotrebu feler bančera jeste njihova sposobnost da povećaju produktivnost cijelog procesa i smanje troškove rada, što ih čini popularnim u Sjevernoj Americi i tropskim regijama gdje se primjenjuju sječe na velikim površinama. Međutim, u

posljednjih nekoliko decenija, neki proizvođači su razvili nove, smanjene jedinice koje su bolje prilagođene evropskim šumama (Spinelli et al., 2007). Mehanizovana sječa, kao što je slučaj sa feller-buncherima, značajno ubrzava proces obaranja stabala u odnosu na motor-manuelne metode.

Feler bančeri mogu biti opremljeni točkovima ili gusjenicama, a koji će se primjenjivati zavisi od terena na kojem se koriste (Slike 5.61 i 5.62). Gusjeničari su pogodniji za teže terene, poput blatnjavih i nepristupačnih područja, gdje su potrebne bolja stabilnost i nosivost, dok su točkaši efikasniji na ravnim i manje zahtjevnim terenima.

Moderni feler bančeri opremljeni su naprednim hidrauličnim sistemima za upravljanje sječivima i manipulaciju oborenim stablima. Neki modeli koriste sisteme za rukovanje s više stabala (eng. multi-stem handling systems), što omogućava obaranje i grupisanje većeg broja stabala u jednom ciklusu, čime se smanjuje broj potrebnih poteza i povećava produktivnost.

Zahvaljujući smanjenju troškova i radne snage, feler bančeri su postali standard u mnogim zemljama, naročito u Sjevernoj Americi, gdje su šumske operacije velikih razmjera česte. Ova metoda sječe doprinosi i smanjenju oštećenja okolnih stabala i vegetacije, što osigurava ekonomski i ekološki održiviji način rada.

Kombinacija sječe i grupisanja čini feler bančeri izuzetno efikasnim za šumarstva koje vrše operacije na velikim površinama, kao što je to slučaj u kanadskim šumama.

Kao multifunkcionalna mašina, feler bančer ne samo da povećava efikasnost, već i smanjuje potrebu za radnom snagom. Najpoznatiji proizvođači feler bančera sa točkovima i gusjenicama su Caterpillar, John Deere, Komatsu Forest, Prentice i TigerCat.



Slika 5.61. Feler bančer John Deer 643L-II



Slika 5.62. Feler bančer John Deere 859M

Tabela 5.15. Tehničke karakterisitke John Deer 643L-II i John Deere 859M

Specifikacija	John Deere 643L-II	John Deere 859M
Snaga motora	163 kW (219 KS)	205 kW (275 KS)
Radna težina	13,910 kg	32,687 kg
Maksimalni obrtni moment	923 Nm	1,315 Nm
Tip pogona	Točkaš	Gusjeničar
Mehanizam sječe	FD55 glava	FR24B sječiva glava
Kapacitet sječe	Do 55 cm u prečniku	Do 66 cm u prečniku

Feler bančeri sa točkovima obično imaju podvozje sa četiri točka, sastavljeno od dva rama spojena zglobom. Pokreti rama se kontrolišu pomoću hidrauličnih cilindara, omogućavajući ugao okretanja od ±45° u odnosu na uzdužnu osu. Klirens ovih mašina varira od 500 do 650 mm, u zavisnosti od veličine pneumatika. Podvozja su opremljena sa dvije fiksne osovine s nezavisnim blokadama diferencijala, dok se zadnja osovina može vertikalno njihati do 15°. Ove mašine obično koriste točkove sa felgama prečnika 26” i širinom pneumatika oko 700 mm, dok se ukupna širina kreće između 2,7 i 3 m. Sa ukupnom težinom između 13 i 16 tona, pritisak na podlogu je od 60 do 80 kPa. Feler bančeri su najčešće opremljeni šestocilindričnim dizel motorima sa zapreminom od 6,5 do 7,5 litara i snagom od 130 do 230 kW, u zavisnosti od modela. Transmisija može biti hidrostatička ili kombinovana, zavisno od proizvođača.

Kabine su fiksne, opremljene sigurnosnim staklom i ispunjavaju ROPS, FOPS i OPS sigurnosne standarde. ROPS (eng. Roll-Over Protective Structure), FOPS (eng. Falling Object Protective Structure) i OPS (eng. Operator Protective Structure) su sigurnosni standardi i sistemi zaštite koji se koriste na mašinama i vozilima, kako bi se osigurala zaštita operatera od potencijalnih nesreća i opasnosti. ROPS je struktura dizajnirana da zaštiti operatera u slučaju prevrtanja mašine. Ova struktura omogućava da kabina ostane netaknuta i da se spriječi smrtonosno prignječenje prilikom prevrtanja. FOPS je struktura koja štiti operatera od padajućih objekata, poput grana ili kamenja. OPS je zaštitni sistem koji se koristi kako bi se zaštitio operater od opasnosti vezanih za udarce i sudare unutar kabine mašine. Često se koristi u šumarstvu kako bi se osigurala zaštita od mogućih opasnosti dok se rukuje sa drvetom i granama.

Osnovne funkcije mašine kontrolišu se pomoću mini-ručica na naslonima za ruke rukovaoca, dok se mašinom upravlja volanom ili mini-ručicama. Feler bančeri sa točkovima koriste kratku hidrauličnu ruku koja omogućava kretanje glave za sječu u vertikalnom pravcu. Ove mašine moraju prići svakom stablu pojedinačno, za razliku od modela sa gusjenicama koji koriste hidrauličnu dizalicu. Glave za sječu služe samo za obaranje, bez mogućnosti obrade stabala, kao što je kresanje grana ili poprečno prerezivanje.

Mehanizmi za sječu najčešće koriste list kružne testere sa maksimalnim prečnikom od 500 do 600 mm. Postoje i varijante sa dva noža, gdje je prečnik sječenja između 300 i 500 mm, kao i modeli sa vodilicom, slično motornim testerama. Glave za sječu često imaju uređaj za hvatanje više stabala odjednom.

Feler bančeri sa gusjenicama su opremljeni hidrauličnim dizalicama koje mogu dohvatiti 8 do 10 metara. U poređenju sa dizalicama na feler bančerima sa točkovima, ove dizalice su robusnije, s dvostruko većim kapacitetom dizanja. Uređaji za sječu na feler bančerima sa gusjenicama često koriste kružne testere sa prečnikom od 550 do 700 mm, ali se koriste i modeli sa vodilicom i lancem. Feler bančeri s gusjenicama često su opremljeni i samonivelirajućim kabinama, što omogućava stabilan i siguran rad na strmim i neravnim terenima (Acuna et al., 2011). Ovaj sistem automatski prilagođava položaj kabine kako bi se održala horizontalna orijentacija, što smanjuje umor operatera i poboljšava vidljivost i kontrolu tokom rada.

Na produktivnost utiče nekoliko ključnih faktora. Veličina stabala je jedan od najvažnijih, jer veća stabla zahtijevaju više vremena za sječu i slaganje, što utiče na ukupnu produktivnost.

Studija (Acuna et al., 2011) je pokazala da je prosječna zapremina stabla od 0,8 m³ dovela do produktivnosti od 138 m³/PMH. Broj stabala koja se mogu oboriti i sakupiti u jednom ciklusu takođe ima značajan uticaj, pri čemu se produktivnost povećava kada se sakupi veći broj stabala po ciklusu, dok je u istraživanju (Acuna et al., 2011) prosjek bio 4 stabla. Gustina šumske sastojine omogućava veću efikasnost jer smanjuje vrijeme kretanja mašine između stabala, što je posebno izraženo u šumama sa većom gustinom. Topografija terena, kao i tip zemljišta, direktno utiču na sposobnost mašine da se efikasno kreće i radi na strmom terenu.

Literatura:

Ackerman, S. A., Talbot, B., & Astrup, R. (2022). The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. International Journal of Forest Engineering, 33(1), 22-32.

Acuna, M., Skinnell, J., Evanson, T., & Mitchell, R. (2011). Bunching with a self-levelling feller-buncher on steep terrain for efficient yarder extraction. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 32(2), 521-531.

Anderson, N., & Mitchell, D. (2016). Forest operations and woody biomass logistics to improve efficiency, value, and sustainability. Bioenergy Research, 9, 518-533.

Andersson, J., & Eliasson, L. (2004). Effects of three harvesting work methods on Harwarder productivity in final felling. Silva Fennica, 38(2), 195-202.

Bačić, M. (2015). Smjernice razvoja harvestera (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Forestry. Department of Forest Engineering).

Bajc, S. (2005). Ročno orodje in vzdrževanje motorne žage. Gozdarska knjižica, Večna pot 2, Ljubljana, pp. 1–48.

Baroth, R. (2005). Literature review of the latest development of wood debarking. University of Oulu, Control Engineering Laboratory.

Bergström, D., Bergsten, U., & Nordfjell, T. (2010). Comparison of boom-corridor thinning and thinning from below harvesting methods in young dense Scots pine stands. Silva Fennica, 44(4), 669-679.

Boellehuus, E. (1992). Transmission systems of machines used in forestry. Skovmaskiners transmissionssystemer.

Bohm, Z. (1996). 70 godina inovacije: STIHL postavlja kamen temeljac u razvoju motorne pile. Šumarski list, 120 (7-8): 367-368.

Bystrický, R., Hošková, P., Hrib, M., Jarkovská, M., Kováč, J., Krilek, J., ... & Natovová, L. (2011). The use of harvester technology in production forests (p. 156). J. Dvořák (Ed.). Kostelec nad Černými Lesy, Czech Republic: Lesnická práce.

Chahal, A., & Ciolkosz, D. (2019). A review of wood-bark adhesion: Methods and mechanics of debarking for woody biomass. Wood Fiber Sci, 51(3), 1-12.

Chi, C. T. (2012). A new electric brush cutter. WSEAS Trans Syst Control, 3(7), 2224-2856.

Colantoni, A., Mazzocchi, F., Cossio, F., Cecchini, M., Bedini, R., & Monarca, D. (2016). Comparisons between battery chainsaws and internal combustion engine chainsaws: performance and safety. Contemporary Engineering Sciences, 9(27), 1315-1337.

Delucchi, M. A., & Lipman, T. E. (2001). An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 6(6), 371-404.

Dereta, B. (1986). Motorne pile lančanice i motorni rotosjekači. Školska knjiga Zagreb, str. 1 – 150.

Dickinson, M. (1994). The technology of debarking logs: common debarking problems and solutions. In: Proceedings of the 1994 Wood Technology Clinic and Show, Portland, Oregano.

Einola, K., & Kivi, A. (2024). Hydraulic Hybrid Cut-to-Length Forest Harvester—Evaluation of Effects on Productivity and Fuel Efficiency. In Actuators (Vol. 13, No. 4, p. 126). MDPI.

Eker, M., Çoban, H. O., & Acar, H. H. (2011). Time study and productivity analysis of chainsaw mounted log debarker in southern pine forests of Turkey. African Journal of Agricultural Research, 6(10), 2146-2156.

Gard Timmerfors, J., Sjölund, T., & Jönsson, L. J. (2020). New drum-chipping technology for a more uniform size distribution of wood chips. Holzforschung, 74(2), 116-122.

Ghaffariyan, M. R. (2022). A short overview of the guidelines, structures and technology developments for cabin protection of forest harvesting machines in Australia. Forest Science (0861-007X), 58(2).

Ghaffariyan M.R. (2016). Analysis of forestry work accidents in five Australian forest companies for the period of 2004 to 2014. Journal of Forest Science, 62(12), 545–552.

Gregur, J. (2015). Povijest mehanizacije u šumarstvu (Završni rad). Preuzeto s https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:449616.

Grzywiński, W. (2009). Energy expenditure in some silvicultural works. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 12(4), 20 p.

Hakkila, P. (2003). Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999-2003. Interim report.

Halilović, V. (2017). Karakteristike i upotreba motornih pila. Šumarski fakultet Sarajevo, 154 p.

Hartsough, B., Spinelli, R., Pottle, S., & Klepac, J. (2000). Fiber recovery with chain flail delimbing/debarking and chipping of hybrid poplar. Journal of Forest Engineering, 11(2), 59-68.

Hiesl, P. (2015). Forest harvesting productivity and cost in Maine: New tools and processes. The University of Maine.

Ishigure, Y., Hirai, K., & Kawasaki, H. (2013). A pruning robot with a power-saving chainsaw drive. In 2013 IEEE international conference on mechatronics and automation (pp. 1223-1228). IEEE.

Ishigure, Y., Kachi, H., Mori, Y., & Kawasaki, H. (2010). Pruning machine with a mechanism for preventing branch bite. In Proc. of Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment (FORMEC 2010) (pp. 1-9).

Ježdić D. (2008). Motorne testere i čistači, Javno preduzeće za gazdovanje šumama, Vojvodina šuma - Petrovaradin, Novi Sad, 260 p.

Johnson, L. (1989). Wood residue recovery, collection and processing. Sec 11., In: Biomass energy project development guidebook. Washington, US Department of Energy, Pacific Northwest Regional Biomass Energy Program: 77 p.

Johansson, J., Liss, J. E., Gullberg, T., & Björheden, R. (2006). Transport and handling of forest energy bundles—advantages and problems. Biomass and Bioenergy, 30(4), 334-341.

Jonsson, R., Rönnqvist, M., Flisberg, P., Jönsson, P., & Lindroos, O. (2023). Country-wide analysis of the potential use of harwarders for final fellings in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 38(1-2), 105-120.

Kellogg, L. D. (1976). A case study of prebunching and swinging: a thinning system for young forests. M.F. Paper, Oregon State University, Corvallis, USA. 88 p.

Kiehne, H. A. (2003). Battery technology handbook (Vol. 118). CRC Press.

Krpan, A. P. B. (1992). Iskorišćivanje šuma. Šume u Hrvatskoj: 1-153.

Laitila, J., & Asikainen, A. (2006). Energy wood logging from early thinnings by harwarder method. Baltic Forestry, 12(1), 94-102.

Legner, D. I. F. J., Rebholz, D. I. F. W., & Morrison, B. R. (2016). ZF cPower–Hydrostatic-Mechanical Powersplit Transmission for Construction and Forest Machinery.

Majdak, I. (2015). Trošenje lanca motornih pila lančanica, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Str. 1-48.

Malík, V., & Dvořák, J. (2007). Harvestorové technologie a vliv na lesní porosty [Harvester Technologies and Impact on Forest Stands]. Lesnická práce.

Marčeta, D. (2019). Tehnologije korišćenja bukovih sastojina. Univerzitet u Banjoj Luci, Šumarski fakultet, 1-173, ISBN 978-99938-56-43-6.

Mergl, V., Pandur, Z., Klepárník, J., Kopseak, H., Bačić, M., & Šušnjar, M. (2021). Technical solutions of forest machine hybridization. Energies, 14(10), 2793.

Mihelič, M., Spinelli, R., Magagnotti, N., & Poje, A. (2015). Performance of a new industrial chipper for rural contractors. Biomass and Bioenergy, 83, 152-158.

Naskrent, B., Grzywiński, W., Łukowski, A., & Polowy, K. (2020). Influence of cutting attachment on noise level emitted by brush cutter during tending of young forests. Croatian

Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 41(1), 129-135.

Niinikoski, J., Ewalds, J., Heikkinen, E., Kotilainen, J., Kääriäinen, M., Tammi, K., ... & Kuosmanen, P. (2016, April). Methods for reducing emissions of small internal combustion engines. In Proceedings of the 11th International DAAAM Baltic Conference, Industrial Engineering, Tallinn, Estonia (pp. 20-22).

Nikolić, S. (1990). Mehanizacija u šumarstvu. Šumarski fakultet Beograd, 201 p.

Pandur, Z., Bačić, M., Šušnjar, M., Landekić, M., Šporčić, M., Jambreković, B., & Lepoglavec, K. (2023). Energy Consumption and Cutting Performance of Battery-Powered Chainsaws. Forests, 14(7), 1329.

Pešík, L., & Skarolek, A. (2014). Simulations of Starting and Braking of the Chainsaw. Acta Mechanica Slovaca, 18(1): 72 - 74.

Pistoia, G. (2009). Chapter 3—portable applications. Battery operated devices and systems. Elsevier, Amsterdam, 75-161.

Poje, A., Potočnik, I., & Mihelič, M. (2018). Comparison of electric and petrol chainsaws in terms of efficiency and safety when used in young spruce stands in small-scale private forests. Small-scale forestry, 17(3), 411-422.

Poršinsky, T. (2005). Djelotvornost i ekološka pogodnost forvardera Timberjack 1710 pri izvoženju oblovine iz nizinskih šuma Hrvatske. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1–170.

Ranta, T. (2005). Logging residues from regeneration fellings for biofuel production–a GIS-based availability analysis in Finland. Biomass and Bioenergy, 28(2), 171-182.

Singh, R. B., Kumar, R., & Das, J. (2013). Hydrostatic transmission systems in heavy machinery: overview. International Journal of Mechanical and Production Engineering, 1(4), 47-51.

Spinelli, R., Cavallo, E., Eliasson, L., Facello, A., & Magagnotti, N. (2015). The effect of drum design on chipper performance. Renewable Energy, 81, 57-61.

Spinelli, R., Cavallo, E., Eliasson, L., & Facello, A. (2013). Comparing the efficiency of drum and disc chippers. Silva Fennica, 47(2).

Spinelli, R., Cuchet, E., & Roux, P. (2007). A new feller-buncher for harvesting energy wood: Results from a European test programme. Biomass and Bioenergy, 31(4), 205-210.

Spinelli, R., & de Arruda Moura, A. C. (2019). Productivity and utilization benchmarks for chain flail delimber-debarkers-chippers used in fast-growing plantations. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 40(1), 65-80.

Stampfer, K., & Kanzian, C. (2006). Current state and development possibilities of wood chip supply chains in Austria. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 27(2), 135-145.

Talbot, B., & Suadicani, K. (2005). Analysis of two simulated in-field chipping and extraction systems in spruce thinnings. Biosystems engineering, 91(3), 283-292.

Uusitalo, J., & Pearson, M. (2010). Introduction to forest operations and technology (p. 287). Hämeenlinna: JVP Forest Systems Oy.

Verani, S., & Speradio, G. (2008). International poplar commission thematic papers. FAO-Forestry department.

Visser, R., & Stampfer, K. (2015). Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 36(2), 321-331.

Volkov, V. S., & Kastyrin, D. J. (2020). Improving the reliability of chainsaws based on alignment of reliability of component links. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 595, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.

Warguła, Ł., Krawiec, P., Kukla, M., Wieczorek, B., & Kaczmarzyk, P. (2020). Innovations in chainsaws utilised as mechanical rescue devices. Safety and Fire Technology, 55(1).

Wegener, J., & Wegener, T. (2012). Wood chipping with helical chippers: observations based on the construction and the use of different prototypes. Applied Engineering in Agriculture, 28(4), 491-501.

Wegener, J. K., & Wegener, T. (2014). Wood chipping with conical helical blades–Theoretical deliberations and practical experiments concerning the adjustment of chip length with a set pitch of the blade. Biomass and Bioenergy, 66, 151-158.

Wester, F., & Eliasson, L. (2003). Productivity in final felling and thinning for a combined harvester-forwarder (harwarder). International journal of Forest engineering, 14(2), 45-51.

Wójcik, K. (2015). Wpływ elementu tnącego na drgania emitowane przez kosy spalinowe do zarośli i trave. Leśne Prace Badawcze, 76(4).

6. MAŠINE ZA PRVU FAZU TRANSPORTA DRVETA

Transport drveta je važna komponenta proizvodnih procesa u šumarstvu, a uključuje dvije glavne faze: primarni i sekundarni transport. Primarni transport se odnosi na kretanje drveta od mjesta sječe (panja) do privremenih stovarišta uz šumske puteve. Sekundarni transport obuhvata premještanje drveta sa stovarišta do krajnjih prerađivačkih lokacija, bilo putem drumskog, željezničkog ili vodenog transporta (Marčeta et al., 2024). Efikasno upravljanje objema fazama je ključno za optimizaciju troškova i povećanje produktivnosti. Primarni transport drveta se još naziva i prvom fazom transporta i vrši se raznim mehanizovanim sredstvima kao što su razne vrste traktora i skidera, forvarderi, žičare, itd. Takođe, koriste se i raznovrsna mehanizacija malih gabarita, kao što su vitla, terenski četverotoškaši i dr.

6.1. Mehanizacija malih gabarita u prvoj fazi transporta

Mehanizacija malih gabarita (eng. small-scale machinery) u šumarstvu se odnosi na manje, prenosive i fleksibilne mašine koje su namijenjene za rad na malim šumskim parcelama, te u uslovima gdje velike mašine ne mogu efikasno raditi zbog ograničenja terena ili neprofitabilnosti (Russell i Mortimer, 2005). Ove mašine, poput mini traktora, vitla, mini-forvardera i drugih lakih mašina, često su dizajnirane za rad na manjim, skučenim prostorima ili u blizini naselja. Njihova upotreba smanjuje uticaj na životnu sredinu i omogućava održivije izvođenje šumskih operacija uz niže troškove.

Osamdesetih godina prošlog vijeka, proizvodne tehnologije, odnosno mehanizacija malih gabarita (eng. small-scale machinery) postale su popularnije u Evropi. One kombinuju motor-manuelne postupke i mehanizovana sredstva manjih gabarita i nižih performansi koja se mogu koristiti za manje obime posla, često na terenima sa otežanim pristupom. Mnoga od tih sredstava nisu dizajnirana za transport drveta, već za rekreaciju, kao što su ATV (terenska kvad vozila) ili za transport ulovljene divljač i počela su se koristiti za transport drveta tek naknadno. Operativni troškovi takve mehanizacije su relativno niski, a i rad je ekološki prihvatljiv. Najviše ih koriste vlasnici manjih površina pod šumom u privatnom sektoru, a mogu se opravdano koristiti i u gazdovanju većim kompleksima šuma, ali i za određene poslove gdje standardna mehanizacija nema pristup.

Efikasnost mehanizacije malih gabarita u šumarstvu znatno više zavisi od obuke i vještine operatera nego što je to slučaj s klasičnom mehanizacijom. Zbog manjih dimenzija i specifičnog dizajna, upravljanje zahtijeva visok nivo preciznosti i prilagodljivosti, posebno u složenim ili nepristupačnim terenima. Dobro obučeni operateri mogu značajno poboljšati produktivnost i smanjiti troškove rada, dok neadekvatna obuka može dovesti do nižeg učinka i povećanih troškova popravke i održavanja opreme (Russell i Mortimer, 2005).

Jednostavniji i manji modeli takvih sredstava, kao što su prenosna vitla su korisni za obavljanje povremenih malih zadataka, a tehnički i tehnološki naprednija sredstva kao što su vitla na sankama sa pogonom ili mini traktori i mini-forvarderi, mogu se trajno koristiti u kombinaciji sa drugim sredstvima u procesu proizvodnje. Sredstva se mogu koristiti u prorednim sječama

i sječama njege, a samo izuzetno u glavnim sječama, pod uslovom da dimenzije proizvedenih trupaca ne prelaze vučne limite ovih mašina. Koncept tehnologije malih gabarita (eng. small-scale technology) se u različitim zemljama različito shvata. U Skandinaviji se čak i tehnologije zasnovane na traktorima na točkovima opšte namjene (adaptirani poljoprivredni traktori) smatraju tehnologijama malih gabarita.

6.1.1. Mobilna vitla

Mobilna vitla se koriste za privlačenje drveta i mogu imati različite konstrukcione karakterisitke, od manjih adaptera za motorne testere, pa sve do samohodnih uređaja (Acay, 2005). Njihova primjena zavisi od tehničkih parametara poput mase uređaja, vučne sile i dužine užeta (dohvata). Manja vitla se koriste u lakšim uslovima rada, dok veći samohodni modeli omogućavaju veće kapacitete privlačenja i veću vučnu snagu, i koriste se kod poslova većeg obima.

Mala prenosna vitla, kao alternativa traktorima opremljenim vitlima, omogućavaju veću fleksibilnost i mobilnost. Prema Visser i Stampfer (2015) ovakva vitla su lakša i jednostavnija za transport, što ih čini pogodnim za manje operacije ili za rad u teže pristupačnim terenima. Osnovno ograničenje prenosnih vitla je njihova niska vučna sila, koja se kreće od 7 do 10 kN (Štícha et al., 2018). Zbog toga se ne mogu koristiti za izvlačenje velikih trupaca ili velikih snopova drveta.

Vitla kao adapteri za motornu testeru predstavljaju najnižu grupu mobilnih vitla koja se koriste za obavljanje malih, povremenih zadataka. Opremljeni su kočnicom vitla, a funkciju kvačila bubnja vrši centrifugalno kvačilo motorne testere. Tehnički parametri predstavljaju kompromis između prihvatljive težine, funkcionalnosti i snage motora motorne testere.

Prenosno vitlo LEVIS sa ušicom za sidrenje na donjoj strani dolazi u dvije verzije: s čeličnim užetom prečnika 5 mm i dužine 45 m ili prečnika 3 mm i dužine 75 m (Slika 6.1). Takođe, dostupna je verzija sa dva bubnja – gornji s užetom prečnika 3 mm i dužine 75 m, te donji s užetom prečnika 5 mm i dužine 45 m, što omogućava rad u jednostavnom sistemu sa vučnim i povratnim užetom. Vitla poput MPN7 i Multi KBF funkcionišu na sličnom principu, dok vitlo KBS Zollern PV 17 Muli ima zamijenjen vučni bubanj nosačem kablova, sa vučnom silom indukovanom posebnim mehanizmom. Snaga motora je 6 kW, prečnik užeta je 7,2 mm, dužina je 60 m, a vučna sila iznosi 17 kN (Slika 6.2).

Prenosna vitla sa sopstvenim motorom su sposobna za trajniju upotrebu, ali kako je njihova masa ograničena potrebom za prenosivosti, ne dostižu značajno bolje parametre od adaptera za motorne testere. Mala vitla na laganom podvozju koje se vuče ručno rješavaju problem povećanja težine vitla iznad granice prenosive opreme sa ciljem povećanja kapaciteta i vuče vitla. Kod ručnog pomjeranja, veća težina zahtjeva postavljanje vitla na lagani donji stroj. Primer može biti Multi FKS koji je ili adapter za motornu testeru ili ima sopstveni motor snage od 4,5 kW. Masa vitla bez motora i podvozja je 27 kg pri čemu je uže prečnika 6,5 mm ili 5 mm dužine 80 m ili 120 m. Vučna sila je 10 kN. Mala vitla na sankama imaju mehanizam za namotavanje užeta u svojevrsnoj kliznoj kadi, a kreću se po terenu vučom uz korišćenje sopstvenih užadi. Donji postroj sanki sa velikom dodirnom površinom i malim pritiskom na

podlogu, kao i kretanje sopstvenim užetom, predodređuje ih za rad na terenima sa slabom nosivošću i na nagibima.

Vitlo Wissen W-10 je primjer vitla na sankama s vlastitim pogonom (Slika 6.3). Pogoni ga motor s unutrašnjim sagorijevanjem snage 11 ili 13 kW, a koristi uže prečnika od 5 do 10 mm i dužine od 230 do 1920 m. Vitlo teži između 400 i 430 kg, zavisno od motora i užeta. Podesivo je pomoću jedne kontrolne poluge, čime se regulišu brzina, vučna sila i smjer rotacije bubnja. Omogućava vuču, podizanje i transport tereta, uz mogućnost spuštanja niz nagib uz pomoć opcionog sistema vazdušne kočnice.





Slika 6.1. Prenosno vitlo LEWIS (www.lewiswinch.com) Slika 6.2. Prenosno vitlo KBS Muli PW 17 Zollern



Slika 6.3. Vitlo na sankama Wissen W-10 (www.wyssenseilbahnen.com)

Tabela 6.1. Tehničke specifikacije vitla Wissen W-10

Karakteristika	Specifikacija
Model	Wissen W-10
Tip	Mobilna žičara (mala kablovska vitla)
Kapacitet vuče	1,8 tona
Maksimalna dužina užeta	1.920 metara (uz uže prečnika 5,0 mm)
Brzina kretanja kolica	0,63 - 1,94 m/s
Pogon	Hidraulički motor (80 ccm, 100 ccm, 160 ccm)
Motor	Benzinski motor 13 kW (18 KS) ili električni motor 11 kW
Dimenzije (D x Š x V)	1.700 x 750 x 820 mm (standardni model)
Masa	345 kg (standardni model)
Prečnik i širina bubnja	220 mm/500 mm

Mobilna vitla se preporučuju korisnicima u šumarstvu koji rade na teže dostupnim terenima i na manjim poslovina. Idealni su za manje operacije, koje zahtijevaju manju snagu vuče, kao što su izvlačenje manjih stabala ili transport tereta male mase. Vitla su pogodna za radnike koji nemaju pristup težoj mehanizaciji ili za one koji traže ekonomično rješenje za povremeni rad.

6.1.2. Mini traktori

Mali traktori se također mogu koristiti u šumarskim operacijama, iako su manje prikladni za zahtjevne radne uslove. Uprkos svojim ograničenjima, pokazuju se vrlo korisnim u manje zahtjevnim radnim okruženjima, gdje njihove manje dimenzije i manja snaga mogu pružiti prednost (Marenče i Krč, 2016). Međutim, nadograđeni dodatnom šumarskom opremom, ovi traktori mogu biti vrlo korisni na malim šumskim parcelama (Spinelli i Magagnotti, 2012).

Mini traktori na točkovima i gusjenicama služe za transport drva na kratke udaljenosti, naročito u prorednim sječama. Primarno su namijenjeni za rad na manjim šumskim parcelama. Jedan od poznatijih modela gusjeničara je IronHorse (Gvozdeni konj), koji je dizajniran za privlačenje drveta u poluodignutom položaju. Ove mašine se često koriste kada jedna osoba vrši i obaranje drveta i privlačenje. Prikolice koje se koriste sa ovim sredstvima mogu poslužiti i kao nosači za oborena stabla koji povećavaju radnu visinu i olakšavaju obradu i utovar drveta. U malim sastojinama sa kratkim distancama drvo se može privlačiti direktno do stovarišta pored puta, čime se eliminiše potreba za izgradnjim vlaka.

Mini traktori ili mini traktori s prikolicom se mogu koristiti u svim metodama sječa. Iako se može činiti da je rad njima jednostavan, nije tako. Rad ovim mašinama je prilično zahtjevan za operatera i traži dosta razmišljanja i vještine. U slučaju kad sastojina nije isparcelisana, radnik treba da procijeni dionicu puta na kojoj će se vozilo popunjavati teretom i da shodno tome prilagodi razmak između trasa kretanja. Ako izabere preveliki razmak između trasa, ostaće unutar sastojine sa natovarenom mašinom, bez mogućnosti kretanja unazad.

Modeli IronHorse dolaze s benzinskim ili dizel motorima, koji imaju snagu od 7 do 16 kW. Opremljeni su gusjenicama koje omogućavaju stabilnost na nagibima i nepristupačnom terenu. Nosivost se kreće od 500 do 1000 kg, a radna brzina obično je oko 2-4 km/h. Njihova relativno mala težina omogućava lako manevrisanje kroz guste šumske predjele i minimizira oštećenje zemljišta (Slika 6.4).

Podvozje ima dvije gumene gusjenice sa ojačavajućim umetkom. Upravljanje je povezano sa konusnim spojnicama gusjenica pomoću vratila, odnosno kada se vratilo okrene u stranu, odgovarajuća gusjenica se koči i mašina skreće. Tokom kretanja, rukovalac drži ručku, hodajući ispred ili iza mašine. Na ručki se također nalaze regulatori brzine i smjera vožnje (napred i nazad), kao i kočnica. Kretanje mašine i rad vitla se vrši pomoću motora s unutrašnjim sagorijevanjem. Brzina kretanja je oko 5 km/h. Mašina je opremljena jednostavnom pokretnom platformom sa sklopivim držačima, pomoću kojih se lakše transportuju drva u snopu. Mašina može privlačiti i dugačke i kratke sortimente. Može se koristiti i na zemljištima sa slabom nosivošću kao i na nagnutim terenima. Primjena Iron

Horse-a se može smatrati ekološki prihvatljivom zbog tog što se kretanje može dobro kontrolisati i na taj način se smanjuju oštećenja dubećih stabala.





Slika 6.4. IronHorse s prikolicom (lennartsfors.com) Slika 6.5. AGT 835 T mali traktor

Marenče i Krč (2016) ispitivali su upotrebu AGT 835 traktora u šumskim operacijama, posebno u manje zahtjevnim uslovima (Slika 6.5). Traktor AGT 835 T proizvodi se u Sloveniji i opremljen je Lombardini LDW 1503 dizel motorom sa 4 cilindra zapremine 1551 cm^3 i snage 26,4 kW. Traktor ima mehanički prenos i pneumatike veličine 750x16. Njegova masa iznosi 1085 kg, a dodatna oprema uključuje zaštitni okvir, prednju oštricu i zadnji vitlo od 30 kN. Analizom je utvrđeno da traktor, uz nadogradnje, može biti efikasan za manje operacije sječe i privlačenja drveta na manjim nagibima do 20%. Rezultati pokazuju da traktor nije pogodan za rad na većim nagibima ili za velike terete. Zaključeno je da mali traktori, uz pravilnu opremu, mogu biti korisni na malim šumskim posjedima, ali su tehnički ograničeni u težim uslovima.

6.1.3. Terenski četverotočkaši

Terenski četverotočkaši ili ATV (eng. all terrain vehicles) su nastali su u Severnoj Americi i prvobitno su bili namenjeni za rekreaciju. ATV-i su korisni u poljoprivredi i šumarstvu jer se lako mogu koristiti za kretanje po neravnom terenu, vuču prikolica, nošenje opreme i vuču manjih tereta (Kincl, 2022). U šumarstvu se najviše koriste u Skandinaviji i Sjevernoj Americi, ali se sve više koriste i u ostalim regionima. Zbog svojih dimenzija i mobilnosti, ATV se pokazao kao izuzetno koristan u radu u gustim, nepristupačnim šumama, poput vještački zasađenih sastojina. Opremljen vitlom, ATV omogućava efikasno prikupljanje i privlačenje drveta. Njegova vučna sila, relativno niska masa i mali pritisak na tlo čine ga ekološki prihvatljivim rješenjem za privlačenje drva u ekosistemima gdje je potrebna zaštita zemljišta i korijenovih sistema stabala (Savelli et al., 2010)

Proizvođači ATV vozila poput Yamahe, Kawasakija, Polarisa, Bombardiera i Yukija dizajnirali su ove mašine na osnovu off-road motocikala, što se ogleda u upravljanju i sjedenju operatera, kao i u samom pogonskom motoru. Klasifikuju se u tri kategorije: sportska, rekreaciono-radna i radna. Radne verzije sa motorima zapremine preko 300 cm^3 i snagom 12-25 kW idealne su za šumarske poslove poput privlačenja drveta. Njihova širina iznosi 1-1,4 m, a težina bez dodataka dostiže do 400 kg. Opremljeni su četvorotaktnim motorima hlađenim tečnošću i manuelnim ili automatskim mjenjačima, sa pogonom na jednu ili obje osovine pomoću kardana. Ovi ATV modeli se koriste u šumarstvu uz dodatke kao što su platforme, prikolice i vitla (električna ili ručna) (Slika 6.6). Pored toga, mogu se opremiti drugim priključcima, poput

pluga, kosilice i forvarder prikolice sa hidrauličnom dizalicom. Njihove glavne prednosti uključuju dobru prohodnost na teškim terenima, brzinu kretanja i sposobnost da se kreću uskim trasama, do 1,40 m širine.



Slika 6.6. ATV sa prikolicom i vitlom (www.daviesimplementsltd.co.uk)

U istraživanju Savelli et al. (2010) je testirano korišćenje Kawasaki KLF 300 ATV vozila u operacijama privlačenja i skupljanja stabala u prvim proredama crnogoričnih plantaža u Italiji. ATV je opremljen električnim vitlom, a testiran je u različitim uvjetima terena i nagibima do 50%. Postignuta vučna snaga bila je 313 daN, dok je produktivnost varirala između 1,20 i 3,05 $td.m.h^{-1}$.

6.1.4. Mini forvarderi i harvesteri

Mini forvarderi i mini harvesteri su specijalizovane mašine koje se koriste u šumarstvu za sječu, privlačenje i transport drveta na manjim površinama i u zahtjevnim terenskim uslovima, kao što su prorede i šume s ograničenim pristupom. Mini forvarderi su manji od klasičnih forvardera, obično sa kapacitetom od 3 do 7 tona, i dizajnirani su da budu fleksibilni i mobilni u uskim prostorima. Njihova glavna funkcija je transport drveta od mjesta sječe do glavnih šumskih puteva. Mini forvarderi su opremljeni hidrauličnim dizalicama za utovar i istovar drveta. Mini harvesteri su male verzije harvestera koji kombinuju funkcije sječe, kresanja i prerezivanja drveta. Sa težinom između 2 i 5 tona, ove mašine su idealne za prorede i manje sječe. Mini harvesteri obično koriste kombinovani manipulator i glavu za sječu, što im omogućava brzo i precizno izvođenje operacija, smanjujući potrebu za dodatnim mašinama.

Forvarderske ekipaže i mini forvarderi su pogodna rješenja za transport drveta u sortimentnom načinu rada, naročito u prorednim sječama. Postoje dvije glavne varijante ovih sistema: forvarderi koji imaju integrisanu konstrukciju s motornim dijelom naprijed i tovarnim prostorom pozadi, te forvarderske ekipaže koje kombinuju motorno vozilo s prikolicom ili poluprikolicom. Šumski konji (poput Jonsered modela) koriste jednostavne poluprikolice s nosivošću do 1 tone, dok ATV-ovi poput ForeSteel FT-1600 koriste prikolice s nosivošću od 1,6 tone, omogućujući lak transport na teže pristupačnim terenima (Slika 6.7).

Mini forvarderi po konstrukciji su slični standardnim šumskim forvarderima. Po pravilu su opremljeni hidrauličnom dizalicom. Postoji mnogo tipova sa podvozjem sa 6 i 8 točkova ili gusenicama (Slika 6.8). Gusjeničari imaju veću prohodnost na terenima sa lošom nosivosti.

Širina mini forvardera je do 1,6 m, masa se kreće od 700 do 2 000 kg i snaga motora između 13 i 33 kW.



Slika 6.7. Lennartsfors IronHorse sa ekipažom



Slika 6.8. Mini forvarder Kinetic 8x8

Mini forvarderi su konstruisano za transport drveta iz proreda, ali mogu nositi i komade većih dimenzija. Nosivost im se kreće između 1,5 i 2,5 m^3, a prduktivnost od 2,5 do 5 m^3/h, u zavisnosti od tipa, opreme i transportne distance.

Upotreba mini-harvestera, naročito u prvim komercijalnim proredama šumskih sastojina, predstavlja značajan korak u unapređenju efikasnosti šumskih radova. Mini-harvesteri, poput gusjeničnog modela, baziranog na bageru Kubota KX057-4 opremljenog specijalizovanom harvesterskom glavom Arbro 400 S, pokazali su se izuzetno korisnim u radu na manjim površinama, gdje tradicionalna mehanizacija može biti nepraktična ili neekonomična. Ovaj tip mašine omogućava selektivnu sječu i preciznu obradu stabala, što je od velikog značaja u prorednim radovima u mladim sastojinama, gdje je potrebno održati ravnotežu između uklanjanja stabala i očuvanja strukture šumskog sastojina. Produktivnost mini-harvestera, prema istraživanjima (Leszczyński et al., 2021), varira između 3,09 i 3,47 m^3 po satu efektivnog rada (PMH15), što je zadovoljavajuća stopa za sječu u uslovima komercijalnih proreda. Ekonomičnost rada mini-harvestera usko je povezana s faktorima poput prosječne zapremine stabala i intenziteta prorede. Iako intenzitet prorede ima značajan uticaj na produktivnost, to se posebno odnosi na plohe uz široke pristupne trase. Na užim trasama, mini-harvesteri mogu imati problema s manevarskim prostorom, što može uticati na smanjenje produktivnosti.

Mini-harvester Vimek 404 SE predstavlja jedan od vodećih modela šumske mehanizacije malih gabarita, posebno dizajniran za selektivnu sječu i prorede u gustim i teško dostupnim šumskim sastojinama (Slika 6.9).



Slika 6.9. VIMEK 404 SE mini harvester i Vimek 404 T8 Duo harvester-forvarder (www.vimek.com)

Vimek 404 SE opremljen je četverocilindričnim dizelskim motorom od 55 kW koji osigurava dovoljnu snagu za rad u svim terenskim uslovima, dok njegova mala mada (oko 3.600 kg) i mala širina omogućavaju jednostavno kretanje kroz sastojinu. Zbog toga je pogodan za rad na terenima gdje velike mašine ne mogu pristupiti, te u šumskim sastojinama koje zahtijevaju osjetljive prorede. Vimek 404 SE je opremljen harvesterskom glavom koja može obraditi stabla prečnika do 30 cm, što ga čini dovoljno fleksibilnim za različite vrste sječe, od manjih proreda do umjereno velikih stabala. Osim toga, Vimek 404 SE nudi i visok nivo udobnosti za operatera. Kabina je ergonomski dizajnirana s odličnim pregledom radnog područja, a kontrole su jednostavne i intuitivne, što smanjuje zamor operatera prilikom dugotrajnih radnih sati. Njegova ekološka prihvatljivost također je važna prednost – zbog male težine i specijaliziranog sistema za raspodjelu težine, pritisak na tlo je minimalan, što smanjuje eroziju i oštećenja šumskog tla.

Vimek 404 T8 Duo predstavlja napredniji model mini-harvestera, razvijen kao multifunkcionalna mašina jer kombinuje funkcionalnost harvestera i forvardera u jednoj mašini, što omogućava veću fleksibilnost i efikasnost u šumskim radovima. Vimek 404 T8 Duo može efikasno sjeći stabla prečnika do 30 cm, a kao forvarder može transportovati oko 4 tone drveta po turi.

6.2. Traktor

Pod privlačenjem se smatra pomjeranje cijelih stabala ili dijelova stabala od mjesta sječe ili sječe i izrade po pomoćnog stovarišta. Može se vršiti na razne načine i različitim sredstvima. Nekad se privlačenje drveta vršilo ljudskom radnom snagom ili animalima, kao i korišćenjem vodotoka ili sile gravitacije, kada se to moguće. Razvojem tehnologije u 20. vijeku omogućeno je uvođenje različitih stepena mehanizacije u privlačenja drveta.

Primicanje i privlačenje drveta iz šume je oduvijek predstavljalo veliki izazov i napor za ljude. U prvoj fazi transporta šumskih drvnih sortimenata vozila se kreću po bespuću ili po sekundarnoj šumskoj transportnoj infrastrukturi, koja uključuje šumske puteve i vlake. Traktor je vučno motorno vozilo koje je u šumarstvu osnovna pogonska mašina većine agregata za koje je potrebna veća snaga (Nikolić, 1990).

Prema namjeni traktori se obično mogu podijeliti na poljoprivredne i šumske (Nikolić, 1990). Poljoprivredni traktori se uz određeno prilagođavanje i dodatno agregatiranje upotrebljavaju i u šumarstvu. Mehanizacija privlačenja drveta u šumarstvu je započela 50-ih godina prošlog vijeka primjenom velikoserijskih poljoprivrednih traktora. U početku su korišćeni bez prilagođavanja za privlačenje drveta, uz pomoć jednostavnih prihvatnih naprava. Zbog tehničkih zahtjeva šumskih terena, traktori su opremljeni zaštitnim konstrukcijama i vitlima za rad u brdskim uslovima ili prikolicama sa dizalicama za prorede u nizinskim predelima. Prednost vitla je što traktor ostaje na traktorskim putevima, smanjujući oštećenja zemljišta i drveća, dok vitlo privlači stabla i trupce ka traktoru na udaljenosti od mesta sječe. Ovakvi traktori su poznati kao adaptirani poljoprivredni traktori.

Šumski traktori imaju originalnu namjenu za rad u šumi, prvenstveno za privlačenje drveta. Pored toga koriste se za agregatiranje s uređajima za koranje, cijepanje drveta, iveranje, krčenje, popravak puteva i dr.

Adaptirani poljoprivredni traktori pri privlačenju šumskih drvnih sortimenata pokazali su i neke nezadovoljavajuće radne karakteristike kao što su velike dimenzije i veliki polupречnik okretanja vozila, slaba uzdužna stabilnost, te veliko opterećenje zadnje osovine pri privlačenju tereta (Gužvinec et al., 2012). Poljoprivredni traktori imaju oko 2/3 ukupne mase praznog traktora na zadnjoj osovini, što se još dodatno povećava ugradnjom vitla na zadnji kraj traktora. Pri privlačenju drveta, prevelika opterećenja na zadnjoj osovini uzrokuju poremećaj stabilnosti adaptiranih poljoprivrednih traktora i smanjenje njihove vučne sposobnosti.

Zbog nedostataka adaptiranih poljoprivrednih traktora, razvijeni su specijalizovani šumski zglobni traktori poznati kao skideri (eng. skidder). Prema ISO 6814:2000 standardu, skider je definisan kao šumsko samohodno vozilo za privlačenje stabala ili njihovih dijelova. Tokom rada, jedan kraj drveta je podignut i oslonjen na zadnji dio vozila, dok se drugi kraj vuče po zemlji. Ključne karakteristike skidera uključuju zglobnu konstrukciju, četiri pogonska točka i opterećenje prednje osovine od oko 2/3 ukupne mase, što poboljšava manevarsku sposobnost i radnu efikasnost u teškim šumskim uslovima.

Uz opremanje šumskih zglobnih traktora vitlom (eng. cable skidder), razvijeni su i različiti mehanizmi za utovar drveta. Tu spadaju hvataljke (viljuške) koje su okrenute prema dolje (eng. grapple skidder), kao i one okrenute prema gore, uz dodatak dizalice za utovar drveta (eng. clam-bunk skidder). Kada se ovakvim traktorima dodaju dizalice i poluprikolice sa prostorom za tovar iza zgloba, stvara se forvarder (eng. forwarder), koji se razlikuje od skidera time što drvo ne vuče, već ga transportuje na vozilu, što omogućava voženje, odnosno izvoženje drveta (Gregov, 2012).

Razvoj skidera započeo je 1881. godine s prvom mašinom na parni pogon. Kompanija "Dolber i Carson Lumber Co." iz Kalifornije patentirala je skider nazvan "Gypsy". Ovaj skider koristio je vertikalni cilindrični kotao, koji je zagrijavan loženjem drveta, dok je proizvedena para pokretala cilindre za okretanje točkova. Drva su se privlačila pomoću užeta. S razvojem motora s unutrašnjim sagorijevanjem, počela je i njihova ugradnja u skidere, čime je unaprijeđena efikasnost i pouzdanost ovih mašina u šumskim radovima (Gregov, 2012).

Godine 1924. proizveden je prvi skider s pogonom na sva četiri točka pod nazivom "Duplex", koji je imao dodatno uže na zadnjem dijelu za pomoć na klizavim terenima. Godine 1943., kompanija "Hyster" razvila je "Caterpillar D7" s vitlom za privlačenje drveta, a prvi veliki uspeh u korišćenju skidera postigao je "Harrison Pulpwood" 1950. godine. Model "Blue Ox" iz 1952. godine, proizveden od strane kanadske firme "KVP", bio je prvi skider s prednjim pogonom, dok je "Timberland Machines" 1956. godine proizvela "Timberskidder", popularan skider s Chrysler V8 motorom od 200 KS. Kasnije, 1960. godine, "Osa" i "Volvo" proizvele su seriju skidera imena "Little Bear", opremljenih kabinom i hidrauličkim amortizerima (Gregov, 2012).

Godine 1968. "Log All Feller" je bio prvi skider s funkcijom sječe drveta, opremljen integrisanom testerom, dok je 1990. "Timberjack 480" postao prvi skider s hvataljkom, sposoban da savlada najstrmije terene. Od 1990. godine, skideri prelaze s mehaničke na hidrostatsku transmisiju, čime nastaju modeli kao što su "Tigercat" i "Morgan Silva" (Gregov, 2012).

Među najpoznatijim svjetskim proizvođačima skiddera danas su kompanije poput "John Deere", "Tigercat Forestry", "Caterpillar", "Franklin Equipment", "Allied Systems", "KMC", "Komatsu Forest", "Silvatech", poznat i kao "Morgan Skidder", i "Prentice".

Primjena šumskih traktora u bivšoj Jugoslaviji započela je krajem šezdesetih godina, tačnije 1968/69. godine, kada je Industrija mašina i traktora (IMT) iz Beograda započela proizvodnju ovih vozila. Prvi adaptirani poljoprivredni traktor korišten u šumarstvu bio je IMT 560. IMT 561 bio je prvi šumski traktor domaće proizvodnje, namijenjen za rad u prebirnim, oplodnim i prorednim sječama, te za izvlačenje trupaca iz šume. Ovaj traktor predstavljao je rješenje za radne zadatke u šumarstvu, koji su zahtijevali veću snagu i izdržljivost vozila (Koncinger, 1988).

Nakon uspjeha s ovim modelima, IMT se posvetio proizvodnji specijalizovanih šumskih traktora, te je iz ove tvornice izašlo nekoliko novih modela, uključujući IMT 547, IMT 559, IMT 561, IMT 579, IMT 5100, IMT 5106, IMT 3130 i IMT 5136. Šumarstvo bivše Jugoslavije bilježi značajan broj traktora u upotrebi. Prema podacima iz 1978. godine, upotrebljavano je 776 šumskih traktora, od čega su 590 bili traktori s kotačima, 22 traktori s gusjenicama, 129 zglobni traktori (skideri) i 26 forvarderi. Pored IMT traktora, koristili su se i traktori drugih domaćih i stranih proizvođača. Među domaćim proizvođačima ističu se "Volvo" iz Švedske, čiji su modeli uključivali Volvo T 800, T 810 i T 814, kao i tvornica "14 Oktobar", koja je proizvodila traktore gusjeničare TG-50 D i TG-90. Takođe, tu su i modeli tvornice "Bratstvo" iz Novog Travnika, kao što su BNT-75 i BNT-90, te zglobni traktor GV-50 iz tvornice "Belt" iz Črnomlja (Tinta, 1983). Ovi modeli su značajno doprinijeli modernizaciji šumarstva bivše Jugoslavije, omogućavajući lakše i efikasnije izvođenje radova u šumi.

Tokom postojanja SFRJ, šumska industrija je bila značajno usmjerena ka istočno-evropskim zemljama, gdje su se najviše koristili ruski gusjeničari, poput traktora TDT 55 i TDT 55a, kao i rumunski traktori TAF 650 i TAF 654. Pored toga, traktori iz zapadnih zemalja, poput Timberjack-a i Caterpillar-a, također su bili prisutni na tržištu. Sedamdesetih godina zabilježen je značajan porast broja šumskih traktora, pa je 1987. godine u SFRJ bilo registrovano 2368 šumskih traktora (Gregur, 2015).

Sever (1980) je u svojoj morfološkoj analizi uporedio adaptirane poljoprivredne traktore sa šumskim zglobnim traktorima s vitlom. Tom analizom je utvrđeno da skideri čine novu kategoriju vozila sa posebnim morfološkim karakteristikama. Klasifikacija traktora u šumarstvu može se vršiti na osnovu različitih aspekata, kao što su tip i snaga motora, dimenzije, namjena, tip kretnog mehanizma, tip šasije i vrsta priključnog oruđa. Danas su traktori najčešće pokretani dizel motorima, dok se sve više istražuju i skideri sa hibridnim pogonom koji kombinuju dizelski i elektro pogon (Šušnjar et. al, 2023).

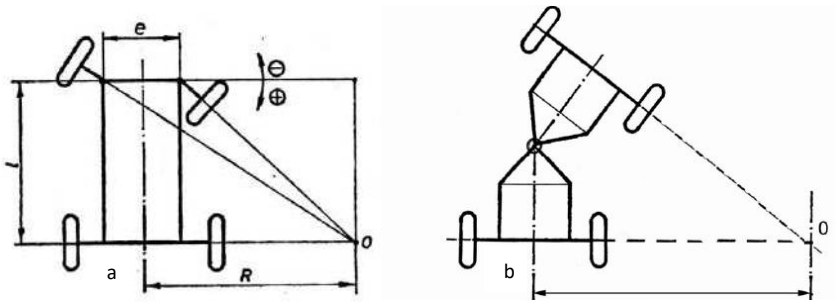


Slika 6.10. Traktor (www.comapire.ma)

Jedna od najčešćih klasifikacija traktora prema snazi motora u šumarstvu je (Nikolić, 1990):

- Laki traktori - do 25 KW,
- Srednji traktori - 26-35 KW,
- Teški traktori - 36-60 KW,
- Vrlo teški traktori - preko 60 KW.

Prema tipu hodnog mehanizma, traktori se dijele na točkaše, gusjeničare i polugusjeničare. Traktori točkaši mogu imati dva osnovna pogonska sistema. Prvi je standardni traktor sa zadnjim pogonskim točkovima (4x2). Drugi tip je traktor sa četiri pogonska točka (4x4), koji se deli na dva tipa. Prvi tip ima manje prednje točkove koji služe i za upravljanje Slika (6.10). Drugi tip ima točkove istih dimenzija i koristi zglobno upravljanje zakretanjem prednjih i zadnjih mostova, poznati kao zglobni traktori (Slika 6.11).



Slika 6.11. Sistemi zakretanja kod traktora: a - na prednjoj osovini, b - zglobni

Traktori točkaši su najdominantniji, jer savremena tehnička rešenja omogućavaju ugradnju različitih tipova gusjenica ili lanaca na točkaše, kao dodatnu opremu (Slika 6.12 i 6.13). Ova prilagodljivost omogućava traktorima točkašima bolju prohodnost u šumskim uslovima, posebno na zahtjevnim terenima, što je česta potreba u šumarstvu. Dodavanje gusjenica ili lanaca pruža veću stabilnost i smanjuje oštećenje zemljišta tokom rada u šumi.





Slika 6.12. Točak s grip trakom (www.west-trak.co.nz) Slika 6.13. Točak s lancem (www.ofa.fi)

Kod adaptiranih poljoprivrednih traktora (APT) korišćenje lanaca se može smatrati obaveznim, dok se kod skidera montiraju po potrebi.

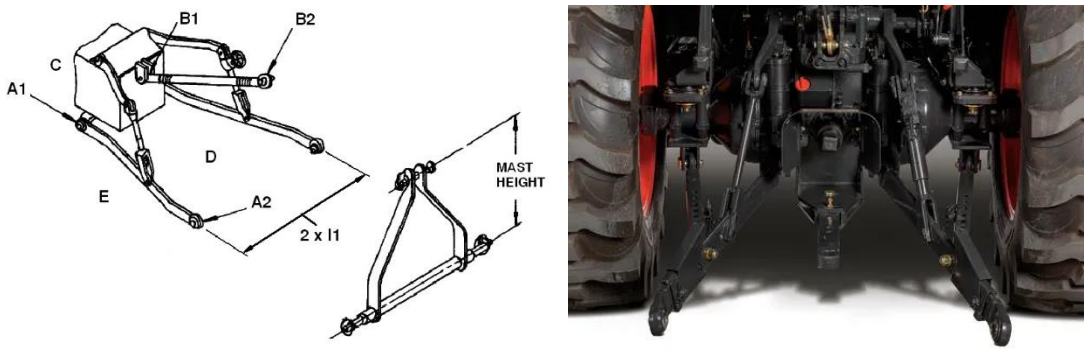
Traktori gusjeničari umjesto točkova imaju gusjenice, koje predstavljau jednu neprekidnu traku sastavljenu od članaka koji su međusobno povezani osovinama (Slika 6.14). Postoje različite izvedbe i materijali od kojih su gusjenice izrađene. Uglavnom se prijenjuju na terenima s nestabilnom podlogom i na velikim nagibima. U zavisnosti od tog kako se teret traktora prenosi na gusjenice mogu se razlikovati krute i elastične. Kod krutih hodni mehanizam ima čvrsti ram na čijim su krajevima pogonski i vodeći točkovi. Gusjenica je na cijeloj dužini koja leži na zemlji kruta. Ove gusjenice su dobre za ravan teren, ali kod neravnog terena ne leže na zemlji cijelom površinom i smanjuje se prijanjanje. Elastične gusjenice se prilagođajavu podlozi i pogodne su za neravne terene. Pogonski i vodeći točak su viši od oslonih zbog čega cijela masa pada na oslone točkove koji su međusobno nezavisni, a njihove osovine su vezane zglobno što u izvjesnoj mjeri omogućava nezavisno pomjeranje svakog točka po vertikali.



Slika 6.14. Šumski traktor gusjeničar MD 35

Priključci se spajaju na traktore preko trozglobne poteznice. To je način spajanja koji je najjednostavniji i jedini statički tačan način spajanja dva tijela u mašinstvu. Ova veza, koja podsjeća na oblik trugla ili slova A (eng. A - frame), postala je industrijski standard zbog svoje funkcionalnosti (Slika 6.15). Harry Ferguson je 1926. godine patentirao trozglobnu poteznicu

u Velikoj Britaniji, a dodatno je unaprijedio uređaj s nekoliko inovacija, poput hidraulike, što je povećalo njegovu efikasnost i primjenu na različitim tipovima traktora.



Slika 6.15. Trozglobna poteznica *(Gornji zglob (B1B2), Donji zglob (A1A2), Tačka donjeg zgloba (A1), Tačka gornjeg zgloba (B1), Donja tačka priključka (A2), Gornja tačka priključka (B2), Osa (CD), Podizna šipka (DE), Visina stuba (A2B2 projektovana), Razdaljina donje tačke priključka (2 x l1)* (Ambike et al., 2007)

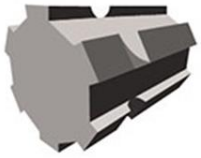
Hidraulični podizači za zakačivanje traktorskih priključaka funkcionišu na hidrostatskom principu. Ulje koje potiskuje hidraulična pumpa koristi se za prenošenje pritiska. Na osnovu jačine pritiska i površine klipa u hidrauličnom cilindru generiše se potisna sila koja vrši rad tokom pomicanja klipa nasuprot teretu. Ovi podizači se koriste za podizanje nošenih i polunošenih oruđa, održavanje oruđa u podignutom stanju, ili u radnom položaju iznad ili ispod površine zemlje.

Osnovni dijelovi hidrauličnog podizača su: hidraulični cilindar s klipom, hidraulična pumpa, spremnik ulja, razvodnik ulja, mehanizam za prenošenje komandi i kontrolna opruga.

Svaki traktor ima hidrauličnu instalaciju kako bi mogao pokretati različite potrošače na priključcima, poput hidrauličnih cilindara ili hidromotora. Hidraulične instalacije mogu biti izvedene na dva osnovna načina. Prva varijanta koristi jednu zajedničku pumpu i razvodnik ulja za hidraulički podizač i ostale potrošače. Druga varijanta uključuje dvije posebne pumpe: jedna se koristi za hidraulički podizač, dok druga pumpa snadbijeva uljem hidraulične cilindre ili hidromotore na priključnim oruđima. Hidraulični uređaji s dvije pumpe su korisniji jer omogućavaju traktoru da istovremeno nosi oruđe i obavlja rad pomoću hidromotora na priključku. Osnovni dijelovi ovih uređaja su hidraulična pumpa, razvodnik ulja, hidraulični cilindar s klipom, cjevovodi i crijevovodi, te kvačila za brzo priključivanje. Umjesto zasebnog rezervorara, koristi se zajednički rezervoar ulja za hidraulični podizač i hidraulične instalacije, čime se pojednostavljuje sistem.

Priključno vratilo ili izlazna osovina koristi se za prenos mehaničke energije s traktora na različite priključke. Najčešće se nalazi na zadnjem dijelu traktora, ali može biti smještena i na prednjem, bočnom ili oba kraja traktora, čime se povećava funkcionalnost za rad s različitim oruđima. Priključno vratilo ima standardizovane dimenzije, broj okretaja (540 ili 1000 rpm) i smjer rotacije prema ISO 500-3 standardima. Ovi parametri su važni za pravilnu kompatibilnost s priključcima (Tabela 6.2).

Tabela 6.2. Standardizovani tipovi priključnih vratila na traktorima (www.agproud.com)

			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3
Prečnik	1 3/8" (35 mm)	1 3/8" (35 mm)	1 3/4" (45 mm)
Brzina (RPM)	540 RPM	1.000 RPM	1.000 RPM
Broj zuba na zupčaniku	6	21	20
Rotacija	U smjeru kazaljke na satu		

Priključno vratilo može biti vezano za pogon na više načina:

- Transmisioni sistem: Direktno spojen preko pomoćne osovine mjenjača. Najstariji način prenosa gdje vratilo prestaje raditi kada se pritisne kvačilo. Koristi se za stacionarne radne mašine.
- Preko mjenjača i reduktora: Usklađuje broj obrtaja radnih dijelova s brzinom traktora, ali zavisi od kretanja traktora.
- Dvostepeno kvačilo: Omogućava rad priključnog vratila bez obzira na kretanje traktora.
- Nezavisni sistem: Kontrolisan zasebnim kvačilom, omogućava potpunu kontrolu nad traktorom i vratilom, mehanički ili hidraulični tip.

Traktori koji su namjenjeni za privlačenje drveta opremaju se različitim dodatnim uređajima. To su:

- Vitla (jednodobošna ili dvodobošna),
- Lanci ili užad za vezivanje oblovine, sa specijalnim kopčama i pločicama (čokeri),
- Hvataljke za oblovinu,
- Noseći ram za jaram za oslanjanje prednjeg kraja oblovine ili tereta,
- Specijalni lanci ili gripovi za točkove,
- Tegovi za dodatno opterećenje prednje osovine i dr.

Postoji više načina privlačenja drveta traktorom:

- Privlačenje traktorom bez vitla,
- Privlačenje traktorom sa vitlom i
- Vožnja traktorom sa prikolicom.

Kod privlačenja bez vitla ima više varijanti:

- Privlačenje traktorom s poteznicom, kukom ili hidrauličnim jarmom,
- Privlačenje traktorom koji ima hvataljku (viljušku) i opciono platformu za oslanjanje prednjeg kraja tereta i
- Privlačenje (nošenje) traktorom koji ima prednje hidraulične čeljusti.

U sve tri prethodna slučaja traktor pri radu mora da priđe svakom komadu drveta koje je predmet privlačenja ili nošenja. Ovaj način rada je neprikladan da brdsko-planinske i planinske predjele i prebirni sistem gazdovanja, tako da se može primjenjivati na blago nagnutim i ravnim terenima u proredama ili čistim sječama.

6.2.1. Skider

Skideri su vozila za kretanje po šumsko bespuću čija je odnovna namjena privlačenje drveta od panja do pomoćnog stovarišta. Početkom 60-tih godina prošlog vijeka prvi put se koriste u šumarstvu Kanade i Norveške (Sever, 1980). Pošto se drvo doprema iz sječine do stovarišta u različitim oblicima, koriste se različite metode privlačenja i oprema u zavisnosti od sistema. Generalno, za operacije koje se odvijaju na zemlji, neobrađeni trupci ili stabla se vuku po tlu uz pomoć skiddera (Spinelli et al., 2021). U zemljama EU, skideri transportuju najmanje 40% godišnje sječe, što je preko 100 miliona m^3 drveta godišnje (Lundbäck et al., 2018).

Pored opremanja šumskog zglobnog traktora (skidera) vitlom (eng. cable skidder) razvijaju se i različite konstrukcije prihvata drveta kao što su hvataljka okrenuta prema dolje (eng. grapple skidder) i hvataljka okrenuta prema gore (eng. clum-bunk skidder).

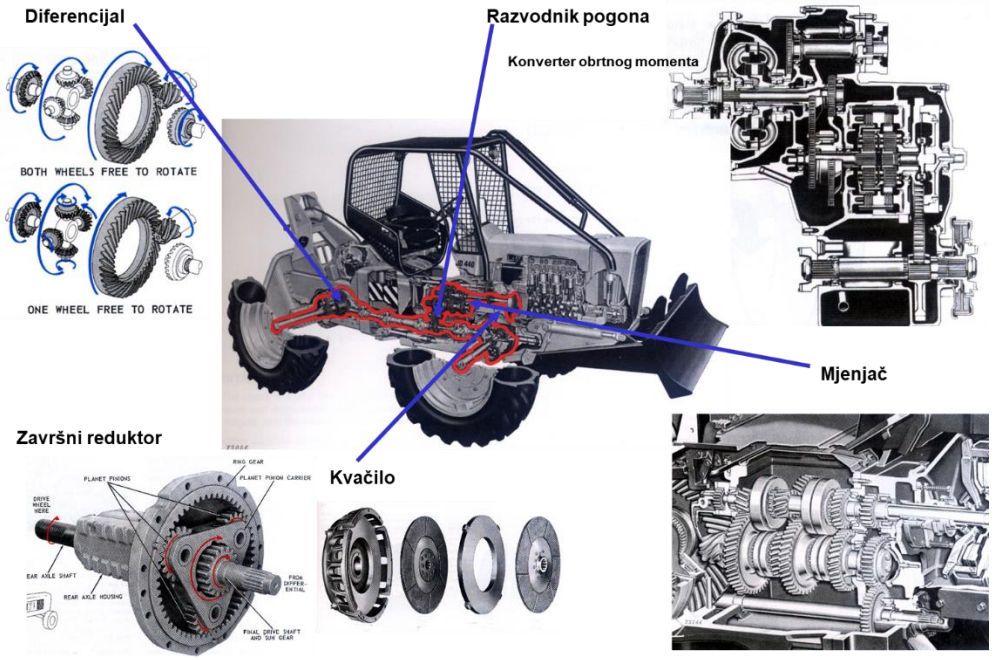
Osnovni parametar koji definiše rad skidera je produktivnost, a to je karakteristika na koju utiču mnogobrojni faktori kao što su: tehničko-tehnološke karakteristke, distanca privlačenja, dimenzije drveta, intenzitet sječe, nagib terena, konfiguracija terena, nosivost podloge, otvorenost sječine sekundarnom putnom mrežom, organizacijom rada i dr.

Najvažniji parametri koji utiču na pokretljivost skidera su: dimenzije vozila, sposobnost savladavanja prepreka i vučne karakteristike. Dimenzije skidera koje utiču na pokretljivost definišu se tokom samog konstruisanja, a najvažniji parametri uključuju gabarite, polukrug okretanja, masu i položaj težišta vozila, uzdužni i poprečni ugao stabilnosti, klirens, ugao zakretanja zgloba i ugao oscilacije prednje osovine. Sposobnost savladavanja prepreka zavisi i od raspodjele opterećenja, načina upravljanja, veličine guma i drugih faktora. Vučni kapacitet skidera predstavlja najvažniju tehničko-tehnološku karakteristiku, a na vučnu silu značajno utiče stanje podloge. Na zemljištima slabe nosivosti dolazi do priklizavanja točkova, što dovodi do gubitka energije i smanjuje vučni kapacitet i produktivnost skidera.
Skideri su zglobna vozila sa dvije osovine i četiri točka, obično jednakih dimenzija, sa pogonom na svim točkovima. Masa je raspodijeljena tako da oko 2/3 ukupne mase otpada na prednju osovinu. Ovakva raspodjela mase je neophodna zbog specifičnog načina privlačenja tereta i osiguranja uzdužne stabilnosti vozila. Tokom privlačenja drveta, prednji kraj tereta se podiže i naslanja na zadnju stranu skidera, čime se dinamička opterećenja prednje i zadnje strane vozila dovode u ravnotežu. U zavisnosti od mase tereta, opterećenje na zadnjoj osovini postaje veće, što dodatno utiče na stabilnost i efikasnost skidera.

Granični tovar koji skider može privući određuje se maksimalno dopuštenim opterećenjem zadnje osovine, uglom uzdužne stabilnosti i ostvarivanjem vučne sile preko točkova. Podvozje skidera sastoji se od dva odvojena rama. Prednji dio vozila sadrži prednji most s točkovima,

motor, mjenjač, diferencijal i kabinu. Na zadnjem ramu, unutar podvozja, nalaze se poluosovine i točkovi, kao i potrebna radna nadogradnja, koja uključuje vitlo, zaštitnu dasku, horizontalne i vertikalne valjke vitla i druge komponente. Prednji i zadnji ram povezani su preko zgloba, koji se može pokretati pomoću hidrauličnih cilindara u vodoravnoj ravni ili u dvije ravni, čime se omogućava zglobno upravljanje. Ovakvo upravljanje olakšava manevrisanje na ograničenom prostoru, što je ključno za efikasnost skidera u teškim terenskim uslovima.

Skidere obično pokreće motor s unutrašnjim sagorijevanjem, najčešće četverotaktni dizel motor. Snaga se od motora do točkova prenosi preko transmisije. Transmisioni sistem sastoji se od spojnice (kvačila), mjenjača, razdjelnika pogona, diferencijala na svakoj osovini i planetarnog ili završnog reduktora na svakom točku. Transmisija može biti mehanička, hidrodinamička, hidrostatska ili hidrostatsko-mehanička. Noviji skideri se gotovo isključivo oslanjaju na hidrostatsku ili hidrostatsko-mehaničku transmisiju, zbog prednosti koje pružaju u pogledu efikasnosti, kontrole i prilagodljivosti različitim radnim uslovima (Slika 6.16).

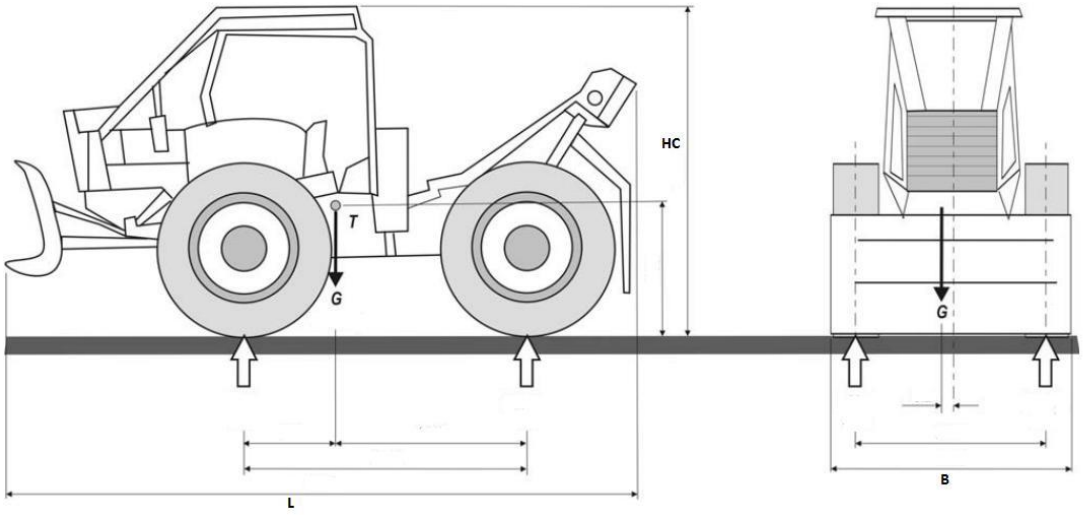


Slika 6.16. Transmisija skidera (www.hiskid.hr)

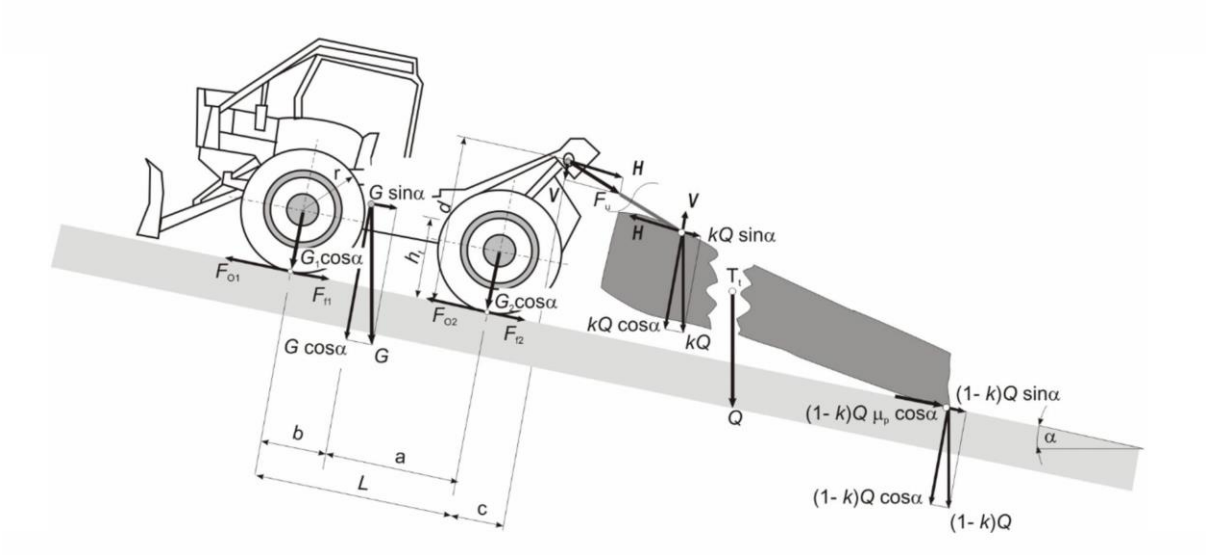
Skideri su pogodni za privlačenje drveta na manjim i srednjim distancama, do 400 metara. Privlačenje na većim udaljenostima dovodi do povećanja troškova i smanjenja produktivnosti. Ipak, u praksi se često dešava da se drvo privlači na znatno većim udaljenostima, što je posljedica nedovoljne otvorenosti šuma primarnom putnom mrežom.

Skideri opremljeni vitlom su najčešće u upotrebi u Bosni i Hercegovini, ali im je produktivnost manja u poređenju s nekim drugim metodama zbog značajnog utroška vremena na prikupljanje tereta, vezanje, odvezivanje i uhrpavanje sortimenata. Uz skider s vitlom, osim rukovaoca, obično ide i dodatni pomoćni radnik, kopčaš, koji rukuje užetom i vezuje sortimente u teret. U nekim organizacionim formama grupnog rada, ulogu kopčaša može

preuzeti sjekač ili njegov pomoćnik, koji istovremeno rade u sječini. Skideri zahtijevaju relativno prostrana pomoćna stovarišta jer ne mogu slagati složajeve sortimenata u visinu, kao što to može forvarder. Sortimenti se mogu uhrpavati odrivnom daskom koja se nalazi na prednjoj strani skidera, ali pri pravljenju većih hrpa postoji rizik od oštećivanja drveta (Slika 6.17). U sječinama, naročito onim gdje se vrši prebirna sječa, često nema dovoljno prostora za formiranje prostranijih stovarišta, pa je dobra sinhronizacija privlačenja drveta i otpreme kamionima ključna za efikasan rad.



Slika 6.17. Shema skidera (www.hiskid.hr)



Slika 6.18. Distribucija sila pri privlačenju drveta skiderom (www.hiskid.hr)

6.2.1.1. Skideri s vitlom

Skideri s vitlom definišu se kao traktori točkaši, s pogonom na svim točkovima i zglobnim upravljanjem, koji koriste vitlo i uže ili lance za prikupljanje i vezanje tereta. Ovi skideri se uglavnom koriste za privlačenje drveta u sastojinama s većim stablima koja se sijeku motornom testerom. Produktivnost skidera s vitlom značajno opada ako su komadi drveta

manji, zbog gubitaka vremena povezanih s prikupljanjem, vezivanjem i formiranjem tereta. Generalno, više se koriste na zahtjevnim terenima i za drvo većih zapremina koje je rasprostranjeno na većim površinama. Jedna od najvećih prednosti skidera s vitlom je njihova sposobnost da privlače drvo s određenih distanci, što ih čini efikasnijim u poređenju s drugim načinima transporta u teškim uslovima. U selektivnom sječama je korišćenje skidera s vitlom često jedini tehnički izvodiv način transporta (Slika 6.19).



Slika 6.19. LKT 81T skider u radu (Foto: Marčeta D.)

Jedna od najvažnijih dodatnih komponenti skidera s vitlom je vitlo samo, koje se obično montira na zadnji dio vozila. Vitlo je opremljeno čeličnim užetom, koje se koristi za povlačenje drveta s udaljenosti do oko 60 metara, a ponekad i više, što zavisi od dužine užeta i sastojinskih prilika. Vitlo je najčešće hidraulički pogonjeno, što omogućava preciznu kontrolu i podešavanje sile povlačenja. Na vitlu su postavljeni horizontalni i vertikalni valjci koji osiguravaju pravilno namotavanje užeta i sprečavaju njegovo oštećenje tokom rada (Mousavi i Naghdi, 2014). Zaštitna (odrivna) daska, koja je montirana na prednjoj strani skidera, služi za zaštitu prednjeg dijela vozila prilikom približavanja drveta, kao i za manipulaciju i uhrpavanje sortimenata. Osim prethodnog, daska takođe može služiti za nivelisanje terena, odnosno izgradnju vlaka (Gülci et al., 2017).

Skideri su opremljeni dodatnim alatom kao što su lanci za vezivanje drveta, hvataljke za manipulisanje trupcima i različiti tipovi kuke za prikačivanje sortimenata. Ovi alati moraju biti izrađeni od visokokvalitetnih materijala kako bi izdržali velika opterećenja i spriječili iskliznuće drva tokom privlačenja. Kuke su dizajnirane da se brzo i sigurno pričvrste na trupce, omogućavajući operaterima da efikasno formiraju tovar (Ozturk, 2007).

Čelično uže je osnovni element svakog vitla, a njegov kvalitet i dužina direktno utiču na performanse vitla. Čelična užad su obično prečnika između 12 i 16 mm, sa dužinom koja zavisi od modela skidera i specifičnih potreba terena (Acar, 2013; Spinelli i Magagnotti, 2011). Kvalitet čeličnog užeta mora biti takav da izdrži ekstremne sile koje se javljaju prilikom povlačenja velikih trupaca. U posljednje vrijeme, sintetička užad postaju sve popularnija zbog svoje lakše težine i jednostavnijeg rukovanja. Sintetička užad su izrađena od materijala poput

polietilena visoke čvrstoće (UHMWPE), koji su izuzetno jaki, a pritom i znatno lakši od čelika. Ova užad su takođe otpornija na koroziju i habanje, ali su osjetljivija na oštećenja od oštrih rubova i visokih temperatura. Kombinovana užad spajaju prednosti čeličnih i sintetičkih užadi. Obično imaju čelično jezgro za dodatnu čvrstoću i sintetički omotač za lakše rukovanje i zaštitu od korozije. Ova užad nude dobar kompromis između izdržljivosti i težine, a često se koriste u operacijama gdje je potrebna visoka nosivost i fleksibilnost (Johansson, 1997).

Tagline ili multi-špan (eng. multi-span) sistemi se mogu koristiti da bi se povećala produktivnost skidera. Ovi termini se odnose na upotrebu više lanaca ili užadi sa klizačima i čokerima za istovremeno prikupljanje i privlačenje drveta, što povećava efikasnost rada skidera. Taglines su sistemi koji koriste tri odvojena seta lanaca ili užadi, sa višestrukim klizačima sa čokerima, koji su prikačeni na uže za privlačenje iz pomoć jednog tipa kvačila za brzo kačenje. Ovaj sistem dozvoljava pomoćnom radniku – kačiocu da veže komade drveta istovremeno dok je skider zauzet privlačanjem drugih komada. To povećava produktivnost, naročito u kod manjih komada i smanjuje vrijeme koje mašina provede u praznom hodu, čekajući na pripremu tereta. Privlačenje svežnjeva (snopova) se odnosi na upotrebu skidera za privlačenje više trupaca koji su prethodno prukupljeni i vezani u svežanj (Slika 6.20).



Slika 6.20. Čokeri za vezanje drveta (www.northamericasupply.com)

Dostupne su različite opcije žičanih užadi za privlačenje. Najviše se koriste čelična užad. U zadnje vrijeme postoji veća zainteresovanost za užad od raznih sintetičkih materijala i njihov potencijal da budu alternativa čeličnoj užadi. Ovaj potencijal proizilazi iz činjenice da sintetičko uže ima snagu i kvalitet svojstvenu čelika, ali je znatno laganije i lakše za upotrebu.

6.2.1.2. Grapl skideri

Grapl skideri ili skideri s hvataljkom, definišu se kao traktori točkaši s pogonom na svim točkovima, koji mogu imati 4, 6 ili 8 točkova, sa zglobnim upravljanjem. Ovi skideri privlače teret tako što odižu trupce s jednog kraja uz pomoć hvataljke, koja je integrisana u konstrukciju vozila. Za razliku od tradicionalnih skidera s vitlom, grapl skideri ne zahtijevaju upotrebu užadi, čokera ili angažovanje pomoćnog radnika - kačioca, čime se pojednostavljuje i ubrzava proces privlačenja drveta. Grapl ili hvataljka je hidraulički upravljan alat koji

omogućava operaterima da hvataju i prenose više stabala istovremeno, smanjujući broj potrebnih prolaza kroz šumu i tako povećavajući produktivnost. Iako je u više istraživanja pokazano da su grapl skideri efikasniji i dalje nisu dostigli popularnost skidera s vitlom (Bembenek et al. 2011, Mousavi et al. 2013) Studija Mousavi et al., (2013) pokazala je da je grapl skider efikasniji i ekonomičniji u ravničarskim uslovima, dok je skider s vitlom pogodniji za različite terenske uslove, uključujući brdsko-planinske terene.

Grapl skideri su posebno dobro prilagođeni za rad u kombinaciji s feler bančerima, jer su u tim situacijama oborena stabla već grupisana, što značajno olakšava rad i smanjuje gubitke vremena koji bi inače nastali pri prikupljanju pojedinačnih komada drveta. Ovi skideri su idealni za privlačenje velikih stabala, gdje bi vezivanje užadima bilo izuzetno otežano zbog veličine i težine trupaca.

Veličina hvataljke kod grapl skidera određena je veličinom tereta, uslovima terena i specifičnim načinom rada. Što je veća viljuška, to je skider sposoban da zahvati i privuče veće količine drveta u jednom potezu. Veličina viljuške, stoga, može direktno uticati na veličinu potrebnog skidera, jer veće viljuške zahtijevaju jače i robusnije vozilo koje može podnijeti dodatno opterećenje (Slika 6.21). Grapl skideri mogu biti opremljeni i vitlom, što im pruža dodatnu fleksibilnost. Ova opcija omogućava skideru da privuče veće komade drveta do vozila prije nego što ih hvataljka zahvati, što je posebno korisno na težim terenima, gdje je pristup svakom komadu drveta mašinom otežan ili nemoguć. Na taj način, skider zadržava visoku produktivnost čak i u izazovnim radnim uslovima, gdje bi drugi tipovi mašina mogli imati poteškoća. Ova kombinacija hvataljke i vitla čini grapl skidere izuzetno svestranim u različitim operacijama, omogućavajući im da se prilagode širokom spektru terenskih uslova i veličinama tereta.



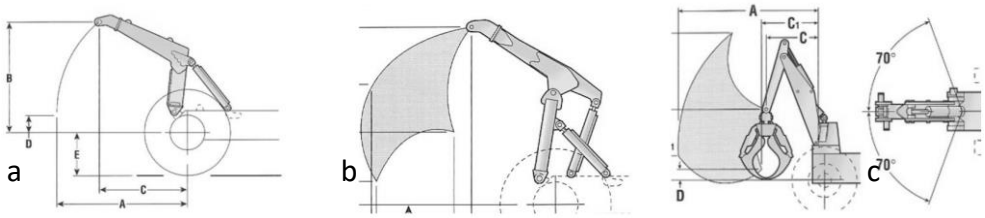
Slika 6.21. John Deer 848 H grapl skider (Rocha et al., 2022)

Grapl ili hvataljka je radni dio skidera koji omogućava privlačenje i transport trupaca. Postoje tri glavne vrste hvataljki: hvataljke za sortiranje, hvataljke za slaganje, i hibridne hvataljke. Hvataljke za sortiranje koriste se za rad s velikim komadima drveta, gdje teret obuhvata jedno ili nekoliko debala. Njihov oblik viljuške omogućava sigurno obuhvatanje i fiksiranje drveta, što je idealno za rad s velikim trupcima. Hvataljke za slaganje koriste se za velike terete sastavljene od većeg broja manjih komada, a njihovo korišćenje preferira se na težim

terenima s neujednačenim i razasutim drvetom, omogućavajući jednostavnije dopunjavanje tereta pojedinačnim komadima. Hibridne hvataljke su konstruisane za oba načina korišćenja, slične su hvataljkama za slaganje, ali se razlikuju po obliku krakova i položaju i hodu cilindara ruku. Hvataljka je obično okačena na luk, a tri različite konfiguracije omogućavaju efektivno prilagođavanje skidera širokom spektru korišćenja. Grapl skideri su opremljeni različitim vrstama hvataljki, koje su specifično dizajnirane za različite tipove operacija u šumarstvu.

Glavne vrste hvataljki uključuju (Slika 2.22):

- Hvataljka s jednim lukom (eng. single arch grapple): Ova hvataljka je jednostavna i ima jednu tačku rotacije koja omogućava pomjeranje hvataljke gore i dolje. Ova konfiguracija je pogodna za rad na ravnijim terenima i za manje komade drva, jer zahtijeva više kretanja mašine da bi se optimalno postavila hvataljka.
- Hvataljka s dvostrukim lukom (eng. dual arch grapple): Ova hvataljka ima dodatnu tačku rotacije i cilindar koji omogućavaju pomjeranje hvataljke naprijed, nazad, gore i dolje, čime se proširuje doseg i omogućava veća stabilnost pri nošenju tereta. Dvostruki luk je posebno koristan na težim terenima i pri radu s većim količinama drva, jer omogućava veće terete i bolju kontrolu nad njima.
- Njihajuća hvataljka (eng. swing boom grapple): Ovaj tip hvataljke je montiran na dizalicu koja može da se pomjera i rotira, omogućavajući dohvat drveta sa strane ili iza skidera. Njihajuća hvataljka je idealna za rad na strmim i nepristupačnim terenima, gdje je potrebno precizno pozicioniranje bez potrebe za mnogo manevrisanja mašinom.



Slika 6.22. Hvataljka a) s jednim lukom, b) s dvostrukim lukom, c) njihajuća

Svaka od ovih hvataljki pruža različite prednosti zavisno od specifičnih uslova terena i vrste drva koje se privlači. Na primjer, dvostruki luk je često preferiran na težim terenima gdje je potrebna veća fleksibilnost, dok njihajuća hvataljka omogućava rad na strmim terenima gdje je pristup otežan.

6.2.1.3. Clum-bunk skideri

Clum-bunk skideri su zglobna vozila s pogonom na svim točkovima, koja mogu biti točkaši ili gusjeničari, dizajnirana za transport cijelih stabala ili debala na specifičan način. Ova vozila funkcionišu tako što podižu jedan kraj drveta s tla i postavljaju ga na platformu koja je oblikovana poput obrnute hvataljke (Slika 6.23). Ovakav način transporta omogućava veću kontrolu i smanjuje trenje između drveta i zemlje, što doprinosi efikasnosti prilikom izvlačenja. Clum-bunk skideri su obično opremljeni hidrauličnom dizalicom za utovar trupaca,

što omogućava jednostavnije rukovanje drvetom na terenu (Kellogg et al., 1993). U nekim slučajevima, utovar može vršiti i zaseban utovarivač, ali je to ređe zbog dodatnog vremena i resursa koji su potrebni za takvu operaciju.

Za optimalne radne rezultate, stabla bi trebala biti položena pod malim uglom prema liniji izvlačenja, s debljim krajem okrenutim u pravcu izvlačenja. Ova tehnika smanjuje opterećenje na mašinu i povećava efikasnost izvlačenja.



Slika 6.23. Clum bank skider Equus 175N UN (www.lesni-technika.cz)

Clam-bunk skideri su namjenjeni za transport većih zapremina na dužim distancama i najbolju produktivnost postižu kada su stabla voluminozna, teren ravan i zemljište je dobre nosivosti. (Staff i Wiksten, 1984). U teškim uslovima ove mašine se mogu opremiti gusjenicama i mogu imati više od dvije osovine i četiri točka. Dobre rezultate postižu na močvarnim terenima, na strmim takođe, a poželjni su i zbog dobre distribucije mase pri opterećenju teretom. To se naročito odnosi na verzije s osam točkova koje se nazivaju i clam-bunk forvarderi.

Nedostaci korišćenja ovih mašina su vezane za dug period utovara koje traje od 5 do 15 min po turi, a i same mašine su veoma skupe i velike mase, tako da se uglavnom mogu efikasno koristiti u čistim sječama. Nemaju vitlo, tako da mašina mora prići svakom drvetu na dohvat hidraulične ruke.

6.2.1.4. Skideri gusjeničari

Skideri gusjeničari su specifična kategorija šumskih mašina baziranih na bagerima koji se, kroz određene modifikacije, prilagođavaju za privlačenje drveta. Međutim, neki proizvođači, poput Caterpillara, nude već fabrički proizvedene skidere gusjeničare, koji ne zahtijevaju dodatne modifikacije.

Prema klasifikaciji koju pruža kompanija Caterpillar, jedan od najvećih svjetskih proizvođača ovakvih mašina, bageri koji se koriste kao skideri spadaju u opseg snage od 55 kW i mase od 7800 kg, do 175 kW i mase od 25700 kg. U praksi, najčešće se koriste mašine u rasponu od 63 do 93 kW, s masom između 8.150 i 12.900 kg. Ove specifikacije omogućavaju skiderima gusjeničarima da se koriste u različitim terenskim uslovima, pružajući im dovoljno snage i stabilnosti za privlačenje drveta na zahtjevnim terenima, poput onih s strmim nagibima ili mekim zemljištem. Caterpillar i drugi proizvođači, poput John Deere i Tigercat, razvijaju ove

mašine s ciljem da odgovore na specifične potrebe šumarskih operacija, i ovi skideri se koriste u poslovima gdje točkaši ne mogu efikasno raditi (Slika 6.24).

Modifikacije bagera kako bi se prilagodili za rad u šumi i funkcionisali kao skideri obuhvataju niz prilagđavanja. Neke od ključnih modifikacija su:

- Postavljanje grapl hvataljke ili vila: Bageri koji se koriste kao skideri opremljeni su specijalizovanim grapl hvataljkama ili vilama. Ove hvataljke omogućavaju bageru da efikasno prikuplja, podiže i transportuje trupce. Grapl hvataljke su posebno dizajnirane za sigurno držanje i manevrisanje velikim količinama drveta.
- Zaštita podvozja, hladnjaka i kabine: Bageri koji rade u šumskim uslovima suočavaju se s velikim rizicima od oštećenja zbog kamenja, trupaca i drugih prepreka na terenu. Stoga, dodatna zaštita podvozja, hladnjaka i kabine je neophodna. Ova zaštita obično uključuje ojačane čelične ploče koje sprečavaju oštećenja od udaraca, kao i zaštitne rešetke za hladnjak i kabinu koje štite kritične komponente mašine.
- Deflektorske šipke i modifikovani vodovi gusjenica: Deflektorske šipke su dodatni elementi koji se postavljaju na bager kako bi se spriječilo oštećenje gusjenica i drugih dijelova mašine prilikom kretanja kroz gustu vegetaciju ili kamenit teren. Modifikovani vodovi gusjenica su dizajnirani da sprečavaju spadanje gusjenica, posebno tokom kretanja po bočnim nagibima. Ove adaptacije omogućavaju mašini da zadrži stabilnost i mobilnost na teškim terenima, smanjujući rizik od kvarova.



Slika 6.24. KMC 2600 skider gusjeničar (www.kmc-kootrac.com)

Neki proizvođači nude fabrički modifikovane skidere gusjeničare za specijalno dizajniranom geometrijom vozila, što podrazumijeva kofiguraciju visokih gusjenica (eng. high-truck), sa odignutim centralnim pogonskim točkom na triangularnoj gusjenici (Slika 6.25).



Slika 6.25. Triangularna gusjenica (www.directindustry.com)

Gusjenice mogu biti šire od standardnih, obično produžene iza mašine zbog bolje distribucije težišta mašine i tereta. Guseničari koji su opremljeni buldozerkim sječivom, sa šest smjerova kretanja, mogu biti veoma korisni za druge operacije, uključujući pravljenje puteva, vlaka, stovarišta, požarnih linija, kao i za čišćenje i pripremu terena. Glavni nedostaci gusjeničara su visoki početni kapitalni troškovi, sporo kretanje i potencijalno velika oštećenja zemljišta prilikom manevrisanja.

6.2.2. Adaptirani poljoprivredni traktor (APT)

Početak uvođenja mehanizacije u proces privlačenja oblog drveta u početku se baziran na primjeni klasičnih poljoprivrednih traktora, koji su korišćeni bez naročitih nadogradnji. Njima se privlačilo oblo drvo uz pomoć poteznice i lanca ili se prevozilo drvo traktorskim prikolicama. Zbog zahtjevnih radnih uslova koji vladaju u šumskim kompleksima koji se uglavnom nalaze u brdskim i planinskim terenima morali su biti tehnički unaprijeđeni, tako da se opremaju zaštitnim konstrukcijama, tegovima lancima i dr. uređajima, kao i šumskim vitlima ili poluprikolicama s dizalicama. Traktori opremljeni vitlom imaju mogućnost da se kreću samo po vlakama i traktorskim putevima, bez potrebe za prilazak svakom stablu, što je i definisano regulativnim aktima kod prebirnog sistema gazdovanja. Time se smanjuje oštećenje šumskog zemljišta i dubećih stabala. Ovako dodatno opremljeni traktori nazivaju se adaptirani poljoprivredni traktori (APT). Primjena APT-a u šumarstvu je otežano zbog većih dimenzija i organičene manevarske sposobnosti, kao i zbog loše uzdužne stabilnosti i velikom opterećenja zadnjeg mosta pri prikupljanju i privlačenju tereta. Zbog toga su se za potrebe šumarstva razvili specijalizovani šumski zglobni traktori - skideri. Upotreba ATP-a je uglavom ostala vezana za prorede i za šumskouzgojne radove.

APT-i su korišćeni u mnogim zemljama u okviru koncepta malih šumskih gazdinstava zbog njihove pristupačnosti i prilagodljivosti (Akay, 2005; Magagnotti i Spinelli, 2011). Studije su pokazale da vuča drveta pomoću APT-a obično zahtjeva prosječan nagib od 15% i distancu privlačenja od 30 do 70 m (Gilanipoor et al. 2012). Upotreba vitla na APT-u može biti efikasna na distancama od 30 do 50 metara sa prosječnim nagibom terena od 25% (Heinrich, 1987). Spinelli et al. (2004) su naveli da troškovi korišćenja poljoprivrednog traktora mogu postati veoma visoki na udaljenostima privlačenja između 150 i 500 m.

U mnogim studijama utvrđeno je da su distanca privlačenja, nagib, zapremina drveta i broj komada u teretu klučni faktori koji utiču na produktivnost poljoprivrednog traktora koji se koristi u šumarstvu (Ozturk, 2010). Dodatna oprema, odnosno priključci za poljoprivredne

traktore za vuču, transport ili utovar može pokazati različite performanse u pogledu produktivnosti sistema (Acar, 1997).

Gulci (2020) je analizirao produktivnost APTa s jednobubanjskim vitlom tokom privlačenja drva stablovnom metodom u područjima s teškim terenskim uslovima. Rezultati su pokazali da privitlavanje uzbrdo zauzima najviše vremena tokom radnom procesa. Prosječna produktivnost privitlavanja uzbrdo iznosila je 12,98 m^3/h, dok je prosječna produktivnost privlačenja drva kretanjem unazad bila 14,30 m^3/h. Troškovi privitlavanja uzbrdo bili su 10,77 €/sat, a privlačenja drva unazad 11,87 €/h.

Poljoprivredni traktori se mogu klasifikovati prema pogonu na dva i četiri točka. Traktori s pogonom na dva točka najčešće se nalaze u klasi malih traktora, sa snagom od 45 do 55 kW, te srednje klase traktora sa snagom od 65 do 71 kW. Ovi traktori, zbog svoje ograničene vučne moći i stabilnosti, uglavnom se koriste u kombinaciji s prikolicama za transport, a ne za direktno privlačenje drveta.

Za šumarske radove i privlačenje drveta, mnogo su pogodniji traktori s pogonom na sva četiri točka. Ovi traktori, s minimalnom snagom od 55 kW pa naviše, mogu se koristiti u raznim šumarskim operacijama. Traktori s pogonom na sva četiri točka pružaju bolju vučnu silu, stabilnost i kontrolu na teškim terenima, što ih čini pogodnim za rad s A-ramom ili vitlom za privlačenje drveta. Također se mogu koristiti za prevoz drveta s prikolicom, čime se povećava njihova svestranost i efikasnost u šumarstvu.

Prije nego što se poljoprivredni traktor stavi u upotrebu u teškim uslovima šumskih područja, odnosno adaptira se, potrebno je izvršiti niz modifikacija kako bi se obezbijedila sigurnost i efikasnost rada. Ove modifikacije obuhvataju:

- Osnovna ROPS/FOPS/OPS zaštita: Traktori moraju biti opremljeni ROPS (eng. Roll Over Protective Structure), FOPS (eng. Falling Object Protective Structure), i OPS (eng. Operator Protective Structure) zaštitom kako bi se zaštitili operateri od prevrtanja traktora, padajućih objekata i drugih opasnosti koje su česte u šumarstvu. Ove strukture su dizajnirane da izdrže udare i pruže maksimalnu sigurnost.
- Zaštitno staklo na svim prozorima kabine: Kako bi se operater zaštitio od krhotina drveta, grana i drugih objekata koji mogu prodrijeti u kabinu tokom rada, svi prozori na kabini traktora trebaju biti opremljeni zaštitnim staklima. Ova stakla su obično laminirana ili kaljena, čime se povećava njihova otpornost na udarce.
- Paneli za zaštitu donjeg podvozja: Donji dio traktora je posebno izložen oštećenjima tokom rada na teškim terenima. Stoga je potrebno instalirati zaštitne panele koji će štititi podvozje od oštećenja od kamenja, panjeva i drugih prepreka.
- Zaštita hladnjaka i bočni štitnici motora: Hladnjak i motor traktora su kritični dijelovi koji moraju biti zaštićeni od oštećenja. Dodavanje zaštitnih rešetki na hladnjak i bočnih štitnika na motor pomaže u sprečavanju oštećenja usljed udara ili kontakta s drvetom i drugim tvrdim objektima.
- Štitnici farova: Farovi su neophodni za rad u uslovima slabe vidljivosti, ali su također vrlo osjetljivi na oštećenja. Instalacija štitnika farova, obično metalnih mreža, štiti ih od udaraca i lomljenja.

- Adekvatni kočioni sistem: Za rad u šumskim uslovima, neophodno je da traktor ima adekvatan kočioni sistem koji funkcioniše kako na glavnom vozilu, tako i na prikolici.
- Dodatni tegovi na prednjoj strani i/ili voda u gumama: Kako bi se povećala stabilnost traktora na strmim terenima, često se dodaju dodatni tegovi na prednjoj strani traktora ili se u gume dodaje voda. Ovo pomaže u snižavanju težišta traktora i povećava vučnu silu, što je ključno za rad u teškim uslovima.

Većina priključaka je montirana na traktor vezom u tri tačke i pogonjena je kardanskim vratilom ili hidrauličnim sistemom.

Direktno privlačenje drveta pomoću A-ram sistema je tehnika koja koristi traktore s hidrauličkim dizanjem u tri tačke. U ovoj metodi, ugaona šipka s prorezima se montira na hidraulični sistem traktora, dok se lanci od legure koriste za pričvršćivanje trupaca. Prilikom ovog procesa, jedan kraj lanca se omota oko debljeg kraja trupca i zategne kroz kliznu kuku, dok se drugi kraj lanca što je moguće kraće pričvrsti za ugaonu šipku. Ova konfiguracija omogućava vezivanje više trupaca istovremeno.

Važno je da krajevi trupaca budu podignuti samo toliko da budu odignuti od zemlje, što sprečava vuču po zemlji cijelom dužinom i smanjuje oštećenja, ali istovremeno ne smanjuje stabilnost traktora. Ako je lanac predugačak, trupci se možda neće podići dovoljno, što smanjuje efikasnost privlačenja. S druge strane, ako trupci budu previsoko podignuti, to može dovesti do podizanja prednjih točkova traktora, što negativno utiče na upravljivost i sigurnost.

Vitla s jednim i duplim bubnjem su standardni priključci za adaptirane poljoprivredne traktore (APT) (Slika 6.26). Ova vitla se pgone preko izlaznog vratila traktora, što omogućava njihovu upotrebu za privlačenje drveta. Kapacitet bubnja vitla obično varira od 35 m do 130 m, zavisno od prečnika bubnja i debljine užeta koje se koristi.



Slika 6.26. ATP sa DGV 2X55 AHK vitlom (www.tajfun.com)

Prednosti korišćenja vitla na APT-u su:

- Veća udaljenost između vlaka: Jedna od ključnih prednosti korišćenja vitla jeste mogućnost da vlake za privlačenje drveta mogu biti postavljene na većim međusobnim udaljenostima. Ovo je zato što vitlo omogućava privlačenje tereta do vlake s udaljenih lokacija, čime se smanjuje potreba za direktnim pristupom traktora do svakog stabla.

- Samopomoć traktora: U slučaju da traktor zapadne u tešku situaciju, kao što je blato ili strm teren, vitlo može biti korišćeno za samopomoć, odnosno samoizvlačenje, omogućavajući traktoru da se sam izvuče iz nepovoljnih uslova. Ovo povećava sigurnost i smanjuje rizik od zastoja u radu.
- Smanjeno vrijeme ture: U poređenju sa direktnim privlačenjem, upotreba vitla može značajno smanjiti prosječno vrijeme potrebno za jednu turu privlačenja. Ovo je zbog toga što vitlo omogućava brže i efikasnije prikupljanje i transport drveta do vlake, bez potrebe za čestim pomicanjem traktora.
- Upotreba pomoćnih užadi: Vitla omogućavaju upotrebu pomoćnih užadi, što može pomoći u boljoj kontroli tereta, posebno na strmim terenima ili u složenim šumskim uslovima. Pomoćna užad može se koristiti za stabilizaciju ili precizno usmjeravanje tereta tokom privlačenja, čime se povećava efikasnost i sigurnost operacija.

APT-i s vitlom mogu biti korisna alternativa u operacijama privlačenja drveta u zemljama u razvoju, gdje je primjena visoke tehnologije često nedostižna (Gulci, 2020).

Traktorske prikolice, poznate i kao ekipaže, predstavljaju APT opremljene šumskom poluprikolicom i hidrauličnom dizalicom (Slika 6.27). Ove ekipaže su manjih dimenzija i mase u odnosu na forvardere, što ih čini pogodnim za rad na zemljištima sa manjom nosivošću. Zbog toga izazivaju manje oštećenja na šumskom zemljištu i sastojini, što je naročito važno pri prorednim sječama u nizijskim predjelima.

Ekipaže su ekonomski isplative, jer njihova nabavna cijena obično manja u poređenju s forvarderima. Ovo je posebno važno u prorednim sječama, gdje je vrijednost drveta relativno niska, pa upotreba jeftinijih, ali efikasnih mašina ima značajnu ekonomsku prednost. Prikolice koje vuče APT snage veće od 70 kW koriste se za transport drveta do stovarišta, a mogu biti samoutovarne (sistem snopova) s hidrauličnom dizalicom ili ručno utovarane. Prikolice koje se koriste u šumarstvu moraju imati integrisane kočione sisteme, što je ključno za sigurnost, posebno na dužim transportnim distancama koje mogu iznositi do 25 km u prvoj fazi transporta drveta.



Slika 6.27. Traktorska ekipaža Valtra (www.valtra.nl)

Danas, zahvaljujući razvoju tehnologija, poljoprivredni traktori modifikovani za obavljanje šumarskih poslova potencijalno omogućavaju višu produktivnost nego ranije. Pored samih

mašina, dobro obučeni operateri sa dovoljno iskustva, znanja i vještina ključni su za postizanje visoke produktivnosti u korišćenju šuma (Enache et al., 2016).

6.3. Forvarder

Forvarderi su specijalizovane šumske mašine konstruisane za transport drveta od mjesta sječe do stovarišta ili direktno do puta, gdje se dalje prevozi kamionima (Stankić, 2010). Uloga im je da utovare i prevezu debla u komadu ili u obliku sortimenata, pri čemu se drvo podiže iznad zemlje kako bi se smanjila oštećenja šumskog zemljišta i podloge. Ovo ih čini ekološki prihvatljivijim u poređenju s drugim metodama izvlačenja drveta, poput skidera, koji vuku debla po tlu, što može uzrokovati značajna oštećenja. U različitim zemljama, forvarderi se koriste na različite načine. Na primjer, u hrvatskom šumarstvu, forvarderi se uglavnom koriste u nizinskim šumama, posebno za izvlačenje drveta iz oplodnih sječa i kasnih proreda (Poršinsky, 2002).

Forvarder je mašina koja je evoluirala iz skidera dodavanjem dizalice i tovarnog prostora iza zgloba. Forvarderi obično imaju pogon na svim točkovima, 4x4, 6x6, ili 8x8 konfiguracije. Koriste se najviše u prorednim i čistim sječama.

Forvarderi su često dio CTL (eng. cut-to-length) sistema iskorišćavanja šuma, u kombinaciji s harvesterima. U CTL sistemu, drvo se prethodno siječe na dužine tj. sortimente, na mjestu sječe, nakon čega ih forvarder prikuplja i prevozi do stovarišta. Ova metoda je visoko efikasna i ekološki prihvatljiva, jer omogućava selektivnu sječu i minimizira oštećenje šumske površine (Slika 6.28).



Slika 6.28. Forvarder John Deer 1910G (www.deere.co.uk)

Početak proizvodnje specijalnog šumskog zglobnog traktora, poznatog kao forvarder, označio je značajnu prekretnicu u razvoju šumarskih mašina i operacija. Ova vozila, često nazivana "vozilima treće generacije", unijela su revoluciju u način na koji se šumski resursi eksploatišu, posebno u područjima s teškim terenima (Bojanin i Sever, 1987). Oni takođe navode da je prvi pravi forvarder konstruisan u Švedskoj 1962. godine. Godine 1969. švedska kompanija Kockum konstruisala je forvarder Kockum 875. Ovaj forvarder je bio odgovor na potrebe šumarske industrije u regijama gdje su tereni izrazito nepristupačni i zahtijevaju visoko

specijalizovane mašine koje mogu efikasno transportovati drvo uz minimalna oštećenja ekoistema (Sever, 1988).

Kako se šumarstvo razvijalo i modernizovalo, tako je rastao i broj forvardera u upotrebi. U Jugoslaviji je već 1978. godine bilo u upotrebi 26 forvardera, što je predstavljalo značajan korak naprijed u iskorišćavanju šumskih resursa. Među prvim forvarderima našao se Volvo BM 860 iz 1976. godine, zglobno upravljano specijalizovano šumsko vozilo koje je služilo za izvoženje sortimenata iz sječine. Ovaj model se istakao kao efikasno rješenje za transport drveta iz šume, postavljajući temelje za dalji razvoj upotrebe forvardera u regionu. Godine 1981. na tržište je plasiran prvi domaći zglobno upravljani šumski traktor, IMT 5132, s motorom snage 120 kW (Slika 6.30). Ovaj traktor je zadovoljio tadašnje potrebe šumarstva u Jugoslaviji i uveo nove standarde u iskorišćavanje šuma. IMT 5132 je bio značajan korak u domaćoj industriji, pokazujući da je moguće proizvesti visoko efikasnu šumarsku mašinu koja može konkurisati inostranim modelima.

Tokom narednih godina, broj forvardera se konstantno povećavao. Na tržištu su se mogli pronaći modeli poput Osa 260, VKS 9041, Volvo SM – 871, i Timberjack 380. Do 1984. godine, u SFRJ je bilo u upotrebi 34 forvardera, što je pokazatelj značajnog rasta i modernizacije šumarske industrije u tom periodu (Gregur, 2015).



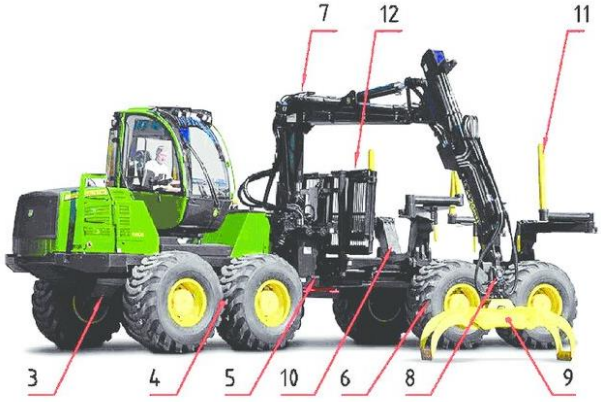
Slika 6.29. Jedan od prvih forvardera VSA Brunetti (www.koneurakointi.fi)



Slika 6.30. Forvarder IMT 5132 (SFRJ proizvodnja)

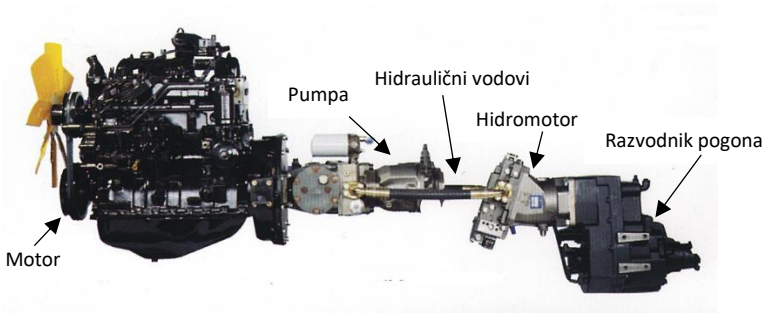
Kabina forvardera je dizajnirana s posebnim akcentom na sigurnost i ergonomiju operatera. Opremljena je ROPS i FOPS sistemima, koji su standardni zaštitni elementi u industriji kako bi

se operater zaštitio od prevrtanja mašine i padajućih objekata. Savremene kabine su zvučno izolovane kako bi se smanjila buka motora i vanjska buka. Osim toga, kabina je često opremljena naprednim klimatskim sistemima koji omogućavaju rad u svim vremenskim uslovima, a sjedišta su podesiva, sa mogućnošću rotacije, što omogućava lakše manevrisanje i kontrolu mašine. Vidljivost iz kabine je dodatno unapređena širokim staklenim površinama i strateški postavljenim retrovizorima i kamerama, što omogućava operateru potpunu kontrolu nad radnim područjem.



Slika 6.31. Konstrukcioni dijelovi forvardera: *1 Motor, 2 Rotirajuća kabina, 3 Osovina, 4 Točkovi prednje osovine, 5 Zglob, 6 Točkovi zadnje osovine, 7 Hidraulična dizalica, 8 Rotator, 9 Hvataljka, 10 Prostor za teret, 11 Ogradni stub, 12 Zaštitne šipke (www.deere.com)*

Tipični forvarderi su opremljeni dizel motorima, snage između 150 kW i 300 kW. Ovi motori su najčešće turbo-dizel, što im omogućava visoki obrtni moment pri niskim obrtajima, ključan za savladavanje strmih nagiba i rad na mekom tlu. Za prenos snage pogonskog motora forvardera na točkove najčešće se koriste mehaničkohidrodinamička, hidrostatsko-mehanička, te hidrostatska transmisija (Sever, 1988). Hidrostatska transmisija ima veće gubitke u odnosu na mehanički prenos, ali omogućava kontinuiranu promjenu brzine bez potrebe za promjenom zupčanika, što je idealno za rad u uslovima koji zahtijevaju precizno manevrisanje, kao što su guste šume ili strmi nagibi. Ova vrsta transmisije koristi varijabilnu pumpu i motor, koji omogućavaju glatko prilagođavanje brzine u zavisnosti od opterećenja i terena (Slika 6.32). Napredni sistemi transmisije na forvarderima uključuju automatsku kontrolu distribucije snage između točkova, što smanjiuje proklizavanje i poboljšava trakciju.



Slika 6.32. Hidrostatska transmisija

Forvarderi su najčešće, zavisno od konfuguracije, opremljeni jednom ili više bugi (eng. boogie) osovina, koje igraju važnu ulogu u poboljšanju stabilnosti i nosivosti vozila tokom rada u teškim terenskim uslovima. Ovaj tip osovine omogućava ravnomjernije raspoređivanje tereta na više točkova, čime se smanjuje pritisak na podlogu i povećava vučna sposobnost. Bugi osovine omogućavaju točkovima da se nezavisno prilagođavaju nepravilnostima na podlozi, čime se smanjuje rizik od prevrtanja i poboljšava prohodnost. Kod natovarenih forvardera, opterećenje se značajno povećava na zadnjoj bugi osovini, jer se najveći dio tereta prebacuje na zadnji dio vozila. Na bugi osovine se vrlo jednostano mogu namontirati polugusjenice, što značajno poboljšava trakciju i stabilnost. Pored toga, postoje i forvarderi gusjeničari, koji su potpuno opremljeni gusjenicama umjesto točkova, što im omogućava još veću nosivost i stabilnost u ekstremnim uslovima rada. Ovi gusjeničari su posebno korisni u šumskim područjima sa mekim i nestabilnim zemljištem, gdje standardni točkovi ili bugi osovine sa polugusjenicama ne pružaju dovoljno efikasnost (Slika 6.33).



Slika 6.33. Forvarder gusjeničar – modifikovani Ponsse Buffalo (www.bioenergyinternational.com)

Forvarderi su opremljeni hidrauličnom dizalicom s zglobovima i hvataljkom za drvo. Zadnji dio forvardera čini platforma koja formira prostor za utovar i transport. Konfiguracija ovog prostora uglavnom zavisi od dužine trupaca koji se prevoze i veličine same mašine. Trupci se utovaraju pomoću centralno montirane hidrauličke dizalice, čija se pozicija može razlikovati u zavisnosti od modela, ali je uobičajno da se nalazi u središtu. Iako se ponekad montira i na prednji dio mašine, ovakve konfiguracije su rijetke.

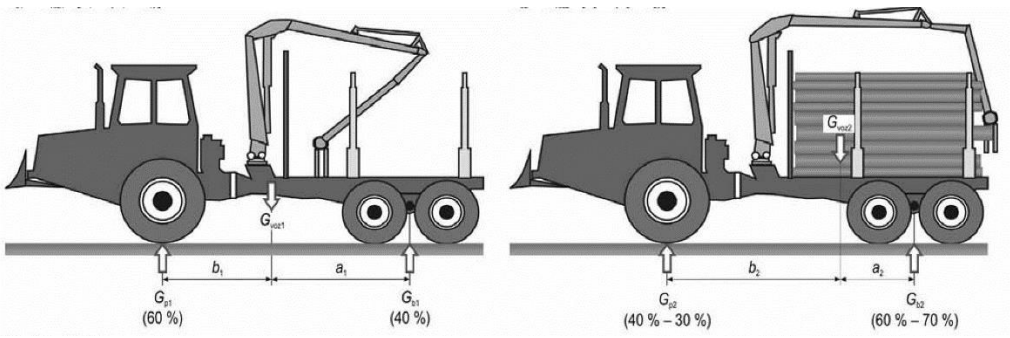
Tabela 6.3. Tehničke karakteristike forvardera John Deere 1910G, Komatsu 855, Ponsse Wisent (Izvori: web stranice proizvođača)

Model	John Deere 1910G	Komatsu 855	Ponsse Wisent
Nosivost	19.0 tona	14.0 tona	12.0 tona
Snaga motora	200 kW (268 KS)	170 kW (231 KS)	150 kW (204 KS)
Zapremina motora	9.0 litara	6.6 litara	7.4 litara
Hidraulična dizalica	Kran CF885, domet 10 m	Kran Komatsu 130F, domet 10 m	Kran Ponsse K70+, domet 9 m
Kapacitet dizalice	200 kNm	180 kNm	160 kNm
Broj točkova	8	8	8
Masa	21.9 tona	18.5 tona	15.2 tona
Maksimalna brzina	23 km/h	20 km/h	20 km/h

Slično kao i kod drugih načina privlačenja drveta, rad forvarderima ima karakteristike cikličnog radnog procesa (Stankić et al., 2012). Na produktivnost forvardera utiču brojni faktori, pri čemu je najvažniji faktor distanca transporta (Sever, 1988). Sa povećanjem distance transporta, raste i uticaj zapremine tereta na produktivnost (Raymond, 1989). Osim distance, na produktivnost utiču i prosječna zapremina sortimenata, broj komada u tovaru i količina drveta na mestu sječe, što je izraženije u sastojinama koje se prorjeđuju (Tufts i Brinker, 1993; Tufts, 1997). Optimizacija zapremine tovara i udaljenosti transporta, kao i davanje prednosti transportu nizbrdo, ključni su faktori za poboljšanje produktivnosti forvardera (Tiernan et al., 2004). Nagib terena veći od 30% značajno smanjuje produktivnost forvardera jer na takvim terenima dolazi do ograničenja pokretljivosti vozila.

Na strmim terenima, do 60%, moguće je koristiti forvardere s pomoćnim vitlom (Kühmaier i Stampfer, 2010). Upotreba polugusjenica u uslovima ograničene nosivosti tla povećava potrošnju goriva, ali obezbeđuje pokretljivost vozila. Osim udaljenosti transporta, zapremine tereta i uslova terena, na produktivnost forvardera utiču i tip sječe, dužina i vrsta sortimenata, vještine i znanje vozača, kao i karakteristike hidraulične dizalice i prostora za tovar (White, 2004).

Forvarder ima ujednačeno osovinsko opterećenje koje je u odnosu 60 % prema 40% (prednja-zadnja osovina) kad je prazan, do 30 % prema 70 % kad je natovaren. Porast opterećenja na zadnjoj osovini dovodi do premještanja tačke težišta od prednje prema zadnjoj osovini, dok opterećenja na prednjoj osovini ostaju gotovo nepromijenjena (Slika 6.34) (Bosner et al., 2008).



G_{voz} – Težina vozila
G_p – Opterećenje prednje osovine
G_s – Opterećenje zadnje (bogi) osovine
a – Udaljenost između položaja tačke težišta i zadnje osovine
b – Udaljenost između položaja tačke težišta i prednje osovine

Slika 6.34. Distribucija osovinskih opterećenja (ne)natovarenoga forvardera (Bosner et al., 2008)

Današnji forvarderi konceptualno se ne razlikuju mnogo od onih prije pola vijeka, ali su značajno napredovali u pogledu ekološke prihvatljivosti, ergonomije i automatizacije upravljanja (Pandur et al., 2009). Jedan od načina za povećanje produktivnosti je upotreba dinamičkog sistema za promjenu zapremine tovarnog prostora, tj. njegove visine i širine. Dodavanje prikolice sa tovarnim prostorom iza zadnjeg dela standardnog forvardera može

povećati produktivnost sistema (Lindroos i Wasterlund, 2011). Istraživanja su sprovedena o upotrebi „platoa“ ili „mjenjačkih tijela“, gdje se drvo ne istovara iz forvardera niti utovara u kamion, već se koristi za oba oblika transporta, čime se povećava produktivnost i pojednostavljuje primarni transport drveta, ali uz povećane troškove.

Jedna od ključnih prednosti forvardera je njegova sposobnost da se jednako dobro kreće i unaprijed i unazad, uz reverzibilno sjedište operatera, što omogućava maksimalnu fleksibilnost tokom rada. Forvarderi dolaze u različitim veličinama, a njihova klasifikacija se najčešće vrši prema nosivosti, koja obično varira od 6 do 25 tona. Manji forvarderi, namjenjeni za rad u komercijalnim čistim sječama i proredama, imaju nosivost do 10 tona. Forvarderi srednje veličine nose od 12 do 14 tona, dok forvarderi najvišeg razreda mogu prevesti do 25 tona. Postoje i specijalizovani forvarderi s još većom nosivošću. Brunberg (2004) klasifikuje forvardere prema njihovoj nosivosti (korisnom teretu) i dieli ih na lake (<10 t), srednje (10 t – 14 t) i teške forvardere s nosivošću većom od 14 t (Brunberg, 2004).

Forvarderi se značajno razlikuju od skidera po tome što podižu teret sa zemlje i prevoze ga, čime se smatraju mašinama s malim uticajem na okolinu (eng. low-impact), jer nema vučnih tragova, a teret nosi i do osam točkova. Forvarderu nije potrebna dodatna pomoćna mašina, jer može sam utovariti, transportovati i istovariti drvo. Ovo ga čini idealnim uređajem za transport iz sastojine u visoko mehanizovanim poslovima ili tamo gdje bi dodatna mašina mogla da oteža i poskupi radni proces.

U šumarstvu Bosne i Hercegovine, forvarder se često koristi u kombinaciji sa skiderima. Skideri privlače drvo do glavnih vlaka, gde ga forvarderi preuzimaju i voze do stovarišta. Ovaj način rada izbegava potrebu da se forvarder kreće po sečini prilazeći svakom komadu drveta, što štedi vreme, a istovremeno se poštuje regulativa koja zabranjuje kretanje mehanizacije van vlaka u prebirnim sečama (Marčeta et al., 2024). Istraživanja pokazuju da produktivnost forvardera HSM 208F u prebirnim sječama i planinskom području iznosi 7,17 m^3/h za distancu pune vožnje od 700 m i distancu prikupljanja tereta od 200 m (Marčeta et al., 2024). Takođe, istraživanje Proto et al. (2018) pokazuje da je produktivnost u rasponu od 15 do 25 m^3/h za distancu izvlačenja od oko 750 m, dok je u slučaju korištenja forvardera John Deere 1110E, produktivnost iznosila oko 15 m^3/h pri izvlačenju na nagibu od 25% i distanci od 700 m. Borz et al. (2021) su utvrdili da za HSM 208F HVT-R2 forvarder, za prosečnu distancu izvlačenja od oko 1,5 km, neto produktivnost iznosi 14,4 m^3/h. Na blagom terenu sa distancom izvlačenja od 1,1 km, Slamka i Radocha (2010) su utvrdili produktivnost od 11 m^3/h. Ovi podaci pokazuju da produktivnost forvardera može varirati u zavisnosti od terenskih uslova, udaljenosti izvlačenja, kao i vrste mašine koja se koristi.

Visoko težište forvardera ograničava njihovu upotrebu na strmijim terenima, gdje su primorani da rade samo uzbrdo ili nizbrdo, kako bi se izbeglo prekomjerno naginjanje vozila koje bi moglo dovesti do prevrtanja (Visser i Stampfer, 2015). Nedostatak trakcije dodatno ograničava maksimalni nagib na kojem forvarder može raditi. Trakcija se može povećati

korištenjem forvardera s više točkova, kao i primjenom pomoćnih sredstava za trakciju, poput gusjenica s trakama (McEwan et al., 2013).

Na kraćim distancama, forvarder je manje efikasan u poređenju sa nekim drugim sredstvima, zbog velikog gubitka vremena na prikupljanje, utovar i istovar. Međutim, na dužim distancama, naročito zbog sposobnosti da prevozi drvo i na udaljenosti preko 1000 m, forvarder pokazuje svoj puni kapacitet, što je za skidere nedostižno.

6.4. Žičano-užetni sistemi

Iznošenje drveta šumskim žičarama je pomicanje drveta po šumskom bespuću gdje je oblovina pomoću užadi djelimično ili potpuno odignuta od zemlje (Tiernan et al., 2002). Drvo se šumskim žičarama transportuje prvenstveno u brdsko-planinskom području, gdje je zbog velikih visinskih razlika na kratkim horizontalnim distancama troškovno i ekološki neprihvatljiva izgradnja sekundarnih šumskih puteva. Sa stanovišta otvaranja šuma šumske žičare su tercijarne šumske komunikacije koje jednokratno otvaraju šumsku površinu (Pičman et al., 2001).

Upotrebom žičara smanjuje se međudjelovanje mašina i zemljišta, čime se u mnogim slučajevima ono u potpunosti otklanja, a takođe se smanjuje oštećivanje sastojine u poređenju s metodama koje uključuju privlačenje drveta vozilima kretanjem po zemlji (Poršinsky i Stankić, 2005; Han i Kellogg, 2000).

Indija, Japan i Kina smatraju se kolijevkama žičara, gdje su stanovnici od davnina koristili primitivne kablove ispletene od loze za penjanje kako bi savladali prepreke. Prvi zabilježeni primjeri upotrebe žičara za transport materijala ili ljudi u zapadnim zemljama desili su se u periodu od 1411. do 1440. godine. Faustus Verantius je 1617. godine dizajnirao tehnički sofisticiraniju opremu. Ova oprema je imala liniju razvučenu između dvije kule, na kojoj se kočija vozila na blokovima. Kočija je bila pričvršćena za beskonačnu liniju koja se pokretala ručno, dok su se merdevine koristile za ulazak i silazak sa kočije.

Počeci transporta drveta žičarom mogu se naći sredinom 19. vijeka. Najprije su korišćeni jednostavna točila sa sajlom ili užetom razvučenim između utovarne stanice i mjesta istovara u dolini, gdje je teret bio uz pomoć kuke zakačen na uže ili žicu. To je bio metod koji se mogao koristiti samo na nagnutim terenima. Žičare su pretrpele značajnu ekspanziju i tokom Prvog svetskog rata (1914 - 1918) kada su korišćene na austrijsko-italijanskom frontu jer je teren alpskih područja zahtjevao izgradnju žičara za snabdjevanje vojske. Ove žičare su na kraju rata prodate trgovcima drvetom. Žičare su se proširile u Austriji, Švajcarskoj, Italiji i Francuskoj. Preduzeće Mayr-Melnhof je konstruisalo prvi jarbol-užetni sistem u drugoj polovini 20. vijeka što je doprinijelo povećanju mobilnosti žičara i smanjenju vremena potrebnog za montažu i demontažu.

U Švajcarskoj je u prvoj polovini 20. vijeka izgrađena šumska žičara Wissen, koja je bila tehnički inovativna jer je njen vagon bio opremljen uređajem za sidrenje na bilo kojem dijelu trase žičare, s mogućnošću fiksiranja tereta u punom vješanju. Ova žičara koristila je vitlo sa jednim bubnjem i sopstvenim motorom, koje se dovlačilo u radni položaj na gornji kraj trase.

Bubanj sa užetom bio je zasebna jedinica. Trasa je postavljana pomoću usidrenog vitla i prethodno zategnuta pomoću hvataljke. Žičare tipa Wissen su spadale među najpouzdanije za velike udaljenosti i korišćene su u planinskim predjelima, gdje zbog ekonomskih razloga ili nepristupačnosti nije bilo padinskih i grebenskih puteva, kao i u zaštićenim područjima.
Žičano-užetni sistemi se mogu podijeliti po više parametara, ali podjela koja ima najširu primjenu prema Conway (1976) i Pulkki (2004) dijeli šumske užetne sisteme na:

- Šumska vitla (eng. forest winches),
- Šumske vučnice (eng. highlead systems),
- Šumske žičare (eng. skyline systems).

6.4.1. Šumska vitla

Šumska vitla su uređaji koji služe za pomjeranje drveta od mjesta sječe do mjesta gdje se formira optimalan tovar za privlačenje, poput vlaka, traktorskih puteva ili žičnih linija. Osnovni dijelovi vitla su pogonski i transmisioni uređaj, bubanj, i vučno uže. Izvlačenje užeta se vrši ručno, dok se teret prilikom vuče u potpunosti oslanja na zemlju.

Postoje dvije glavne vrste šumskih vitla: samostalna šumska vitla koja imaju vlastiti pogonski uređaj i vitla koja koriste pogon vozila na koja su postavljena, kao što su skideri ili adaptirani poljoprivredni traktori. Takođe, vitla mogu biti ugrađena i na forvardere, motorne testere, prikolice i druge vrste radnih sredstava. U složenijim žičano-užetnim sistemima, vitla čine osnovni sastavni dio tih sistema, omogućavajući efikasnije sakupljanje i transport drveta (Košir, 1987). Mala šumska vitla koja su dodatak na morotnu testeru ili su na sankama su obrađena u sklopu poglavlja 6.1. koje se bavi mehanizacijom malih gabarita.

Šumska vitla koja se postavljaju na adaptirane poljoprivredne traktore, skidere, forvardere ili druga šumska vozila predstavljaju važan dodatni uređaj, omogućavajući ovim mašinama obavljanje zadataka privlačenja i transporta drveta u zahtjevnim terenskim uslovima. Ova vitla su obično sastavljena od čeličnog okvira koji nosi glavni bubanj na koji se namotava čelično uže. Ovaj okvir je dovoljno robustan da izdrži velike sile koje se razvijaju tokom vuče, dok bubanj ima dovoljno kapaciteta da primi dugu dužinu užeta, što je posebno važno za rad na velikim udaljenostima. Vitla su opremljena različitim vrstama kočionih sistema, poput mehaničkih, hidrauličnih ili pneumatskih kočnica, koje omogućavaju kontrolu napetosti i sprečavaju preopterećenje.

Pored osnovne strukture, vitla mogu imati dodatke kao što su zaštitne rešetke, uređaji za automatsko vođenje užeta, i sistemi za brzo otpuštanje, koji povećavaju funkcionalnost i sigurnost u radu. Konstrukcija često uključuje i različite priključke i nosače, kako bi se vitlo moglo lako montirati na različite tipove vozila, poput traktora, skidera ili forvardera. Vitla na skiderima su obično integralni dio mašine i dolaze fabrički integrisane na skideru.

Pogon šumskih vitla kao priključaka može biti različit, zavisno od modela i specifičnih potreba korisnika. Najčešće se koriste sljedeći pogonski sistemi:

- Mehanički pogon: Ovaj tip pogona je često povezan direktno na osovinu traktora ili drugog vozila putem kardanskog vratila. Mehanički pogon obezbeđuje pouzdan prenos snage, ali zahtjeva precizno usklađivanje brzine rada vitla sa radom motora vozila.
- Hidraulički pogon: Hidraulička vitla koriste energiju hidrauličnih pumpi koje su ili integralni deo vozila ili montirane kao dodatna oprema. Hidraulički sistem omogućava precizno upravljanje snagom i brzinom vuče, što je posebno korisno u kompleksnim operacijama u šumi.
- Električni pogon: Električna vitla su manje uobičajena, ali se koriste u specifičnim situacijama gde je potreban tihi rad ili kada postoji ograničen pristup gorivu. Ova vitla se obično napajaju putem generatora ili direktno sa električnog sistema vozila.

Kod forvardera, kao i kod drugih mašina, vitlo može imati trakcionu ulogu, odnosno može pomoći pri savladavanju strmih terena. To se postiže tako što se vitlo veže za dubeće stablo ili neki drugi jarbol, čime se "pridržava" vozilo prilikom kretanja, povećavajući stabilnost i omogućavajući bezbjednije kretanje na izazovnim terenima.

Poznatiji proizvođači šumskih vitla, a čija se vitla koriste u regionu su: Igland, Uniforest, Tajfun, Herzog i drugi (Slike 6.35 i 6.36).



Slika 6.35. APT sa Uniforest 2x75HK vitlom (www.uniforest.com)



Slika 6.36. Forvarder sa HERZOG *Alpine* SYNCHROWINCH trakcionim vitlom (www.herzog-reinhardt.de)

Tabela 6.4. Tehničke specifikacije Uniforest 2x75H, Tajfun EGV 105 AHK i Herzog Alpine Synchrowinch vitla (web sajtovi proizvođača)

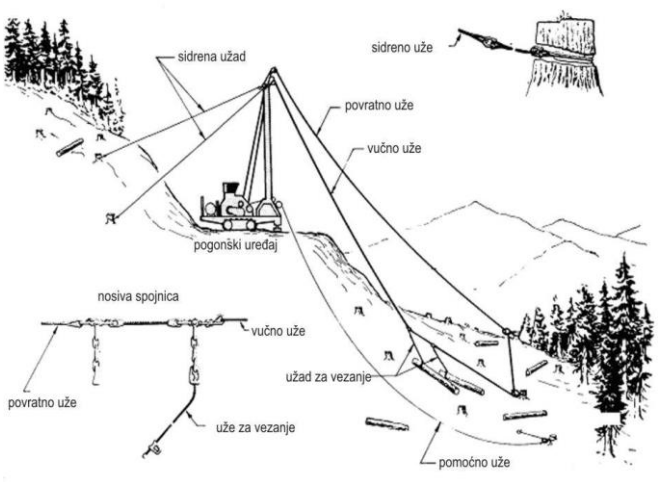
Karakteristika	Uniforest 2x75H	Tajfun EGV 105 AHK	Herzog Alpine Synchrowinch
Povlačna sila	75 kN x 2 bubnja	100 kN	100 kN (regulisano)
Kapacitet sajle	110 m (sajla Ø 12 mm)	130 m (sajla Ø 14 mm)	280 m (sajla Ø 15 mm) ili 350 m (sajla Ø 14,5 mm)
Pogon	Hidraulički	Hidraulički	Hidrostatički sa planetarnim zupčanikom
Težina	1120 kg	770 kg	1900 kg
Pogodno za traktor snage	81–132 kW (110–180 HP)	74 kW (100 HP)	N/A (specijalizovano za forwardere)
Tip kočnice	Automatska hidraulična	Diferencijalna	Integrisana sigurnosna kočnica
Maksimalna brzina povlačenja	0,7 m/s	0,7 m/s	N/A (sinhronizacija sa radnim tempom)
Dodatne funkcije	Daljinsko upravljanje, dvojni bubanj	Daljinsko upravljanje	Elektronska sinhronizacija, automatska kontrola zatezanja sajle, kamera za praćenje bubnja

Samostalna šumska vitla koja se mogu samostalno kretati predstavljaju naprednu opremu koja omogućava izvođenje složenih radova u najtežim terenskim uslovima. Ova vitla su konstruisana sa integrisanim sistemima za pokretanje, što im omogućava da se nezavisno kreću po terenu, bez potrebe za dodatnom opremom ili mašinama za vuču. Obično su opremljena gusjenicama ili točkovima, što im omogućava kretanje po različitim vrstama terena. Opremljena najčešće dizelskim motorima, često, koji omogućavaju visoku autonomiju rada. Pogonski sistemi su im obično hidrostatički. Upravljanje se može vršiti putem daljinskog upravljača ili direktno sa kontrolnog panela na samom vitlu. Kapacitet bubnja i dužina sajle variraju zavisno od modela, ali većina ovih vitla može nositi dugu užad koja omogućavaju rad na velikim udaljenostima. Pored toga, sistem za automatsko namotavanje i kontrolu napetosti sajle osigurava ravnomerno opterećenje i smanjuje rizik od habanja ili pucanja sajle.

Ova vitla služe za privlačenje drveta, ali mogu poslužiti i kao trakciona vitla za pomoć vozilima, poput forvardera ili skidera, pri kretanju na strmim i klizavim terenima.

6.4.2. Šumske vučnice

Šumske vučnice (eng. highlead) suspecifičan tip žičano-užetnog sistema za transport drveta. Osnovne karakteristike šumskih vučnica podrazumijevaju prisustvo dva užeta, vučnog i povratnog, što zahtijeva dvobubanjsko vitlo za pravilno funkcionisanje. Ova konfiguracija omogućava kretanje tereta bez potrebe za upotrebom kolica pri utovaru drveta. Za kačenje tereta koriste se dvije glavne naprave: nosiva spojnica (eng. butt rigging) i nosiva koturača (eng. rider block, monkey block) (Slika 6.37).
Nosiva spojnica je čelična konstrukcija koja povezuje vučno i povratno uže sa užetom za vezanje tovara, omogućavajući stabilan transport. S druge strane, nosiva koturača omogućava da vučno uže prolazi kroz nju, nastavljajući se kao uže za vezanje tereta. Ovaj način prihvata tereta omogućava postranično sakupljanje drveta na manjim udaljenostima do žične linije, čime se povećava efikasnost (Conway, 1976; Samset, 1985).



Slika 6.37. Šumska vučnica (Poršinsky i Stankić, 2005)

Područje rada šumskih vučnica obuhvata završne i čiste sječe na ravnim terenima i nagnutim terenima, gdje su preporučeni nagibi sljedeći: manje od 20% pri privlačenju drveta nizbrdo i manje od 50% pri privlačenju uzbrdo (Pulkki, 2004). Sa aspekta sigurnosti pri radu, privlačenje drveta šumskim vučnicama je preporučljivo kada se radi uz nagib terena (WBC, 1999).

Privlačenje drveta šumskim vučnicama se ubraja među metode privlačenja drveta gdje je teret u potpunosti oslonjen na zemlju, što često uzrokuje značajna oštećenja zemljišta i podmlatka. Ovakav način privlačenja drveta posebno je problematičan u prorednim sastojinama, gdje dolazi do velikih oštećenja preostalih stabala. Zbog toga su šumske vučnice često ocijenjene kao neprihvatljive metode (Poršinsky i Stankić, 2005). U nekim zemljama, zbog negativnih efekata upotrebe šumskih vučnica u prošlosti, došlo je čak do zabrane upotrebe šumskih žičara, što je ocijenjeno kao neopravdano (Dykstra i Heinrich, 1996).

6.4.3. Šumske žičare

Šumske žičare su žičano-užetni sistemi koji se koriste za transport drveta pri čemu je drvo potpuno odignuto od zemlje duž kretanja glavnom trasom. Ovi sistemi se oslanjaju na mrežu užadi (kablova) koja omogućavaju transport drveta između različitih tačaka, najčešće iz šume do mjesta gdje se dalje obrađuje ili skladišti. Žičare se sastoje od užadi (glavno uže i povratno uže), kolica, vitla i pogonskih mašina. Glavno uže se obično postavlja između dva stabilna oslonca, kao što su drveće ili stubovi (jarboli), i koristi se za prenos tereta, dok povratno uže služi za vraćanje praznih kolica nazad do mjesta utovara. Ova kolica se kreću duž glavnog užeta i nose teret (trupce), omogućavajući efikanasn transport na strmim ili nepristupačnim terenima. Žičare se najčešće koriste na terenima gdje je teško pristupiti teškim mašinama, čime se smanjuje oštećenje zemljišta i vegetacije.

Osnovna karakteristika im je prisustvo najmanje dva užeta. Jedno od tih užeta služi za vuču tereta, dok drugo, osim drugih mogućih funkcija, uvijek ima zadatak nošenja tereta. Pomičnost i pokretljivost užadi omogućavaju višebubanjska vitla (Košir, 1997).

Šumske žičare klasifikuju se prema broju užadi potrebnih za njihov rad, a mogu imati jednu, dvije, tri, četiri, pet ili više užadi (Trzesniowski, 1998). Užad koja se koriste u šumskim žičarama

razvrstavaju se prema funkciji i uključuju nosivo uže (skyline), vučno uže (mainline), povratno uže (haul-back line), podizno uže (hoisting line, skidding line), pomoćno uže (auxiliary line), uže za pričvršćivanje tereta (choker), uže za sidrenje i stabilizaciju (guyline) te višenamjensko uže (multi-purpose line) (Poršinsky i Stankić, 2005).

Univerzalne karakteristike šumskih žičara uključuju nekoliko ključnih elemenata. Noseće uže, koje čini osnovu trase žičare, postavljeno je cijelom dužinom iznad tla i oslanja se na stubove ili druga sidrišta, poput dubećih stabala, panjeva ili specijalno pripremljenih konstrukcija. Transport drveta obavlja se kolima koja se kreću duž nosećeg užeta, dok je oblovina za transport pričvršćena za kola.
Za povlačenje užeta do tovara koristi se dodatni uređaj, koji olakšava manipulaciju materijalom. Tokom transporta, oblovina je djelimično ili u potpunosti podignuta od tla, čime se minimalizuju oštećenja zemljišta i šumskog pomlatka duž trase. Pogonski sistem žičare je fiksan i ne kreće se po zemlji, što je značajna razlika u odnosu na većinu drugih konvencionalnih metoda iskorišćavanja šuma. Ove karakteristike čine žičare efikasnim i ekološki prihvatljivim sredstvom transporta drveta.

Luk nosećeg užeta žičare predstavlja dio užeta razapet između dva susjedna oslonca. Kada žičara ima samo jedan luk, odnosno samo dva oslonca, riječ je o jednolučnoj žičari. U suprotnom, ako žičara ima više oslonaca, onda se radi o višelučnoj žičari. Višelučne žičare se obično koriste za veće transportne udaljenosti i na promjenjivim brdsko-planinskim terenima.

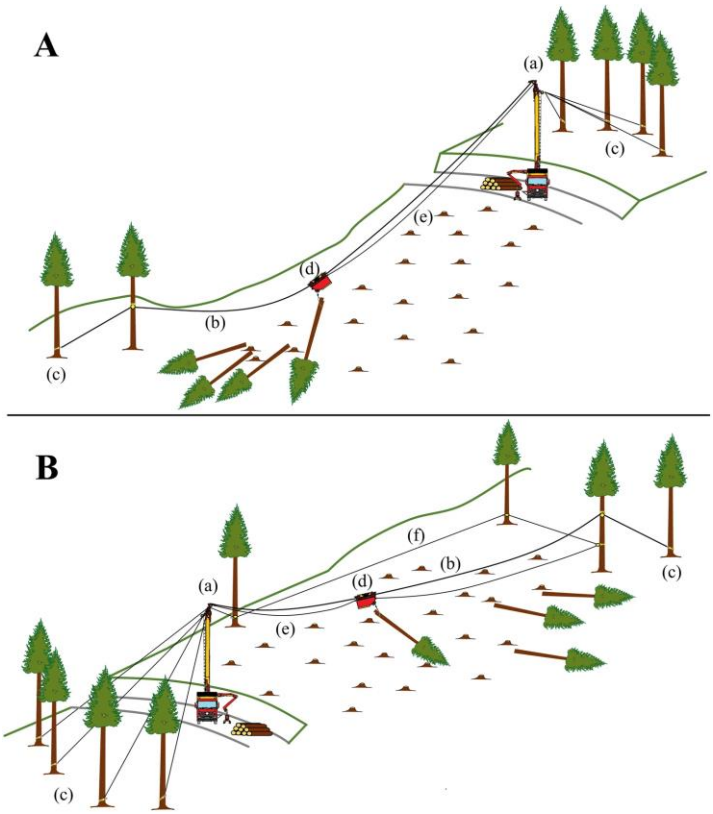
Ugib nosećeg užeta, ili vertikalna udaljenost između zamišljene prave linije koja spaja vrhove luka i samog užeta, prirodno nastaje zbog mase užeta, a dodatno se povećava kada se dodaju kolica s teretom. Prihvatljiv ugib užeta obično se kreće od 6% do 15%.

Šumske žičare se mogu razlikovati prema smjeru iznošenja drveta. Kod gravitacionih žičara, koje iznose drvo uz nagib, povratno uže nije potrebno jer se kolica pod uticajem gravitacije sama vraćaju u sječinu. Kada se drvo iznosi niz nagib ili na ravnom terenu, povratno uže je potrebno za vraćanje neopterećenih kolica u sječinu (Slika 6.38).

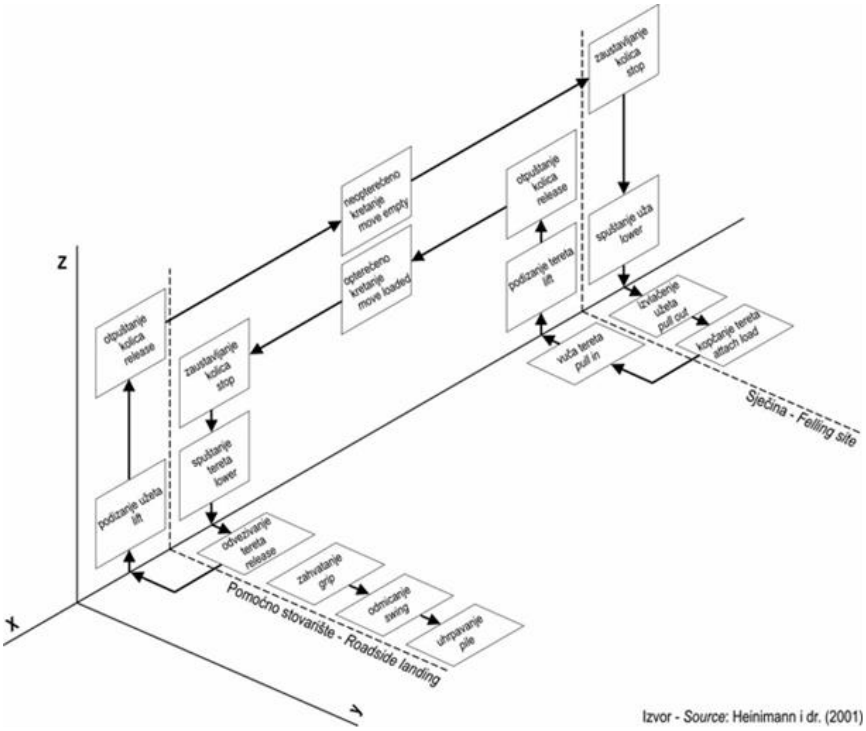
Postoji mnogo različitih vrsta kolica koja se koriste u šumskim žičarama, a mogu se podijeliti prema različitim karakteristikama kao što su nosivost, način pogona, način izvlačenja užeta za vezanje, i mogućnost zaustavljanja kolica na određenom mjestu (Trzesniowski, 1998; Košir, 1997). Kretanje kolica po nosećem užetu omogućuje pogonski uređaj, koji može biti smješten direktno u kolica, što je sve rjeđi slučaj, ili na nekoj lokaciji na kraju trase, što je u većini slučajeva. Pogonski uređaj može biti smješten i na transportnom sredstvu poput kamiona ili forvardera, ili imati vlastite točkove kao priključno vozilo.

Kada je pogonski uređaj, najčešće motor s unutrašnjim sagorijevanjem, smješten van kolica, radna energija se prenosi do kolica putem sistema užadi. Neka kolica imaju mogućnost zaustavljanja na mjestu utovara zahvaljujući kočnici.

Izvlačenje užeta za vezanje može biti ručno ili mehanizovano. Mehanizovano izvlačenje može se obavljati putem užeta koje pokreće osnovni pogonski uređaj žičare ili putem motora smještenog u samim kolicima, koji može biti elektromotor, motor s unutrašnjim sagorijevanjem (SUS), ili hidraulični motor.



Slika 6.38. Osnovni dijagram sistema šumske žičare s nosećim užetom u postavci za iznošenje drveta uzbrdo (A) i nizbrdo (B): *(a) vitlo, (b) noseće uže, (c) sidrišta, (d) kolica sa čokerima koja povezuju teret, (e) vučno uže, i (f) povratno uže (prema [5], prilagođeno)* (Varch et al., 2021).



Slika 6.39. Prikaz rada šumske žišare (Heinimann i dr., 2001)

Rad šumske žičare najjednostavnije je prikazati uz pomoć trodimenzionalnog koordinatnog sistema (Slika 6.39) (Heinimann et al., 2001)

Smjer trase žičare predstavlja x-osu, z-osa predstavlja vertikalan pravac, tj visinu na kojoj je noseće uže postavljeno iznad zemlje, a y-osa predstavlja bočnu udaljenost od trase žičare do oblovine koja se prikuplja. Heinimann i dr (2001) definišu više tehničkih namjena žičare:

- Transport (x-osa): otpuštanje kolica na stovarištu, kretanje neopterećenih kolica od stovarišta do sječine, zaustavljanje kolica u sječini, otpuštanje kolica u sječini, kretanje opterećenih kolica iz sječine do stovarišta.
- Podizanje/spuštanje (y-osa): spuštanje vučnog užeta (kuke) na zemlju u sječini, podizanje tereta (oblovine) od zemlje u sječini, spuštanje tereta na zemlju na stovarištu, podizanje vučnoga užeta na stovarištu.
- Vuča (y-osa): izvlačenje vučnog užeta od trase žičare do izrađene oblovine ili posječenog stabla, postranično privlačenje oblovine od panja (mjesta vezivanja) do trase žičare.
- Prihvat oblovine: vezivanje oblovine na mjestu sječe i izrade stabla i odvezivanje oblovine na stovarištu.
- Pogon: osigurava snagu za vuču, podizanje i povrat.

Danas postoji veliki broj proizvođača šumskih žičara koji nude različita konstrukcijska rješenja svojih proizvoda. Prema klasifikaciji Samsetu (1985), šumske žičare mogu se podijeliti prema dužini trase na:

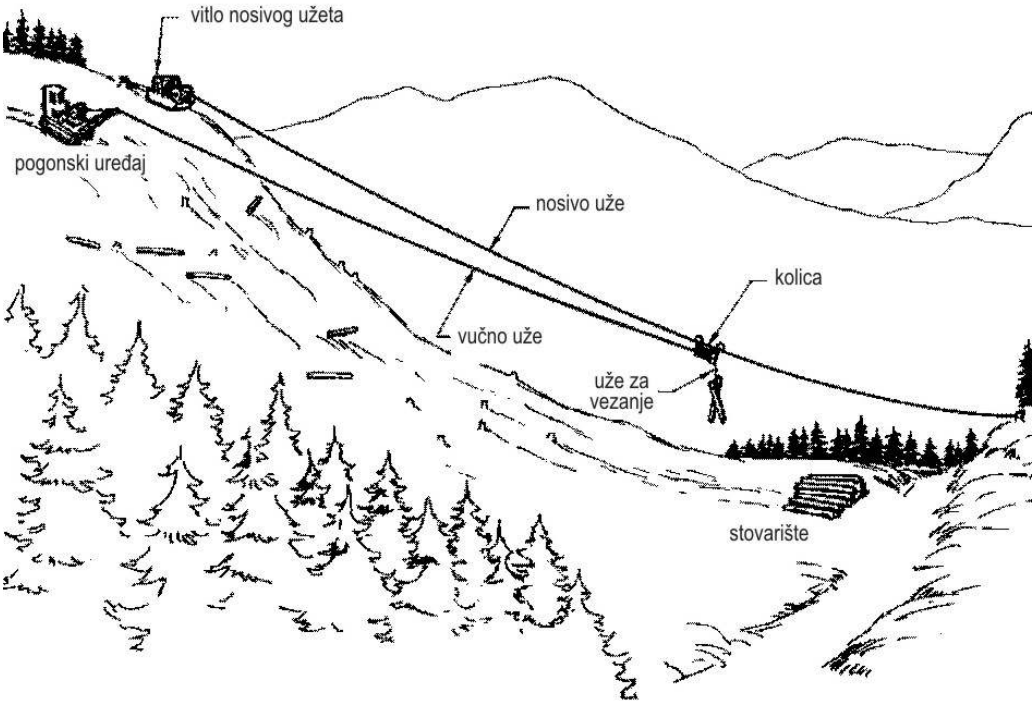
- Žičare kratkih trasa (kraćih od 300 m),
- Žičare srednje dugih trasa (od 300 do 800 m),
- Žičare dugih trasa (od 800 do 2000 m).

Prema nosivosti, šumske žičare se dijele na:

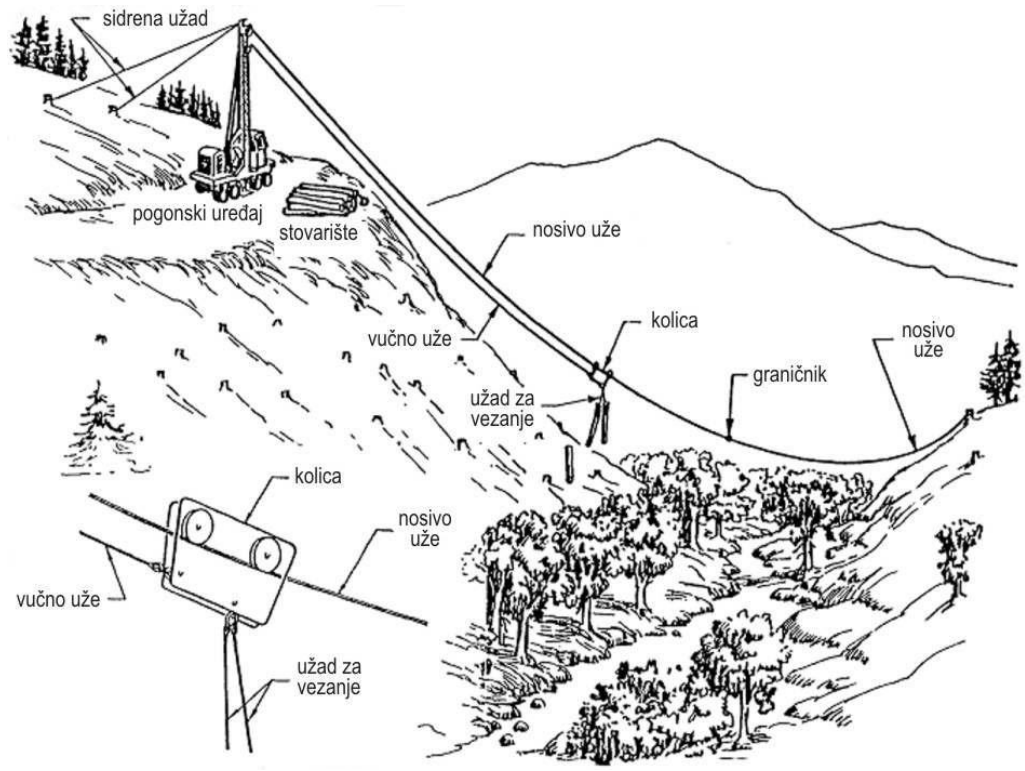
- Vrlo lake žičare (nosivosti manje od 0,5 tona),
- Lake žičare (od 1 do 2 tone),
- Srednje teške žičare (od 2 do 3 tone),
- Teške žičare (od 3 do 5 tona),
- Vrlo teške žičare (nosivosti veće od 5 tona).

U zavisnosti od toga da li je noseće uže nepomično ili pomično, odnosno čvrsto usidreno na krajevima, šumske žičare se dijele na:

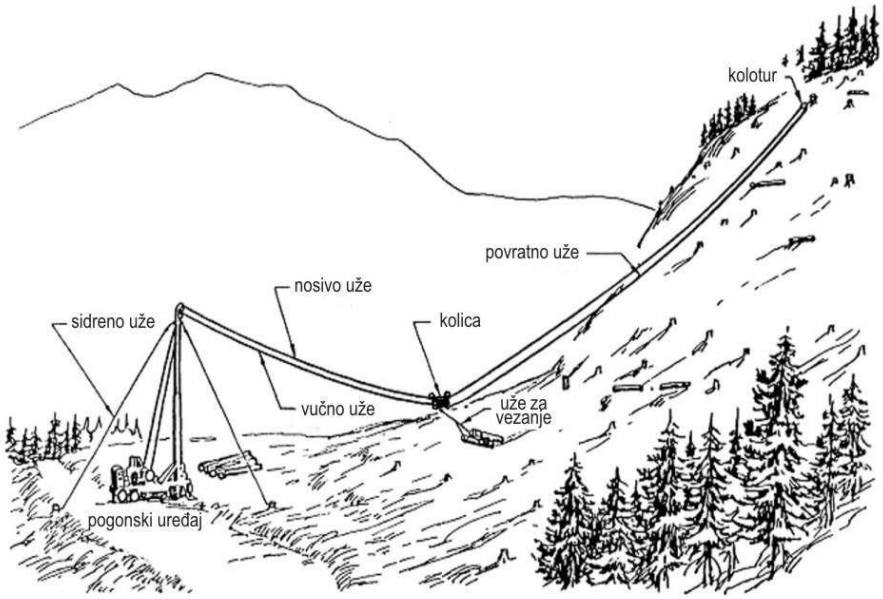
- Žičare sa nepomičnim nosećim užetom: Noseće uže je čvrsto vezano za oslonce na oba kraja i ne može se pomjerati tokom rada. Ova vrsta žičare pruža stabilnost i koristi se u situacijama kada je potrebna precizna kontrola nad teretom.
- Žičare sa spuštajućim nosećim užetom: Ove žičare omogućuju podizanje i spuštanje nosećeg užeta tokom rada. Kada se kolica zaustave na mjestu vezivanja tereta, uže se otpušta zajedno s kolicima, što omogućava lako vezivanje tereta.
- Žičare sa pokretnim nosećim užetom: Ova verzija predstavlja poboljšanu varijantu šumske vučnice. Umjesto noseće spojnice ili koturače, koriste se kolica, dok podignuti oslonac na jednoj strani stvara potreban ugib užeta za iznošenje oblovine do stovarišta.



Slika 6.40. Šumska žičara s nepomičnim nosivim užetom (Poršinsky i Stankić, 2005)



Slika 6.41. Šumska žičara sa spuštajućim nosivim užetom – gravitaciona (Poršinsky i Stankić, 2005)



Slika 6.42. Šumska žičara s pokretnim nosivim užetom – iznošenje uz nagib (Poršinsky i Stankić, 2005)

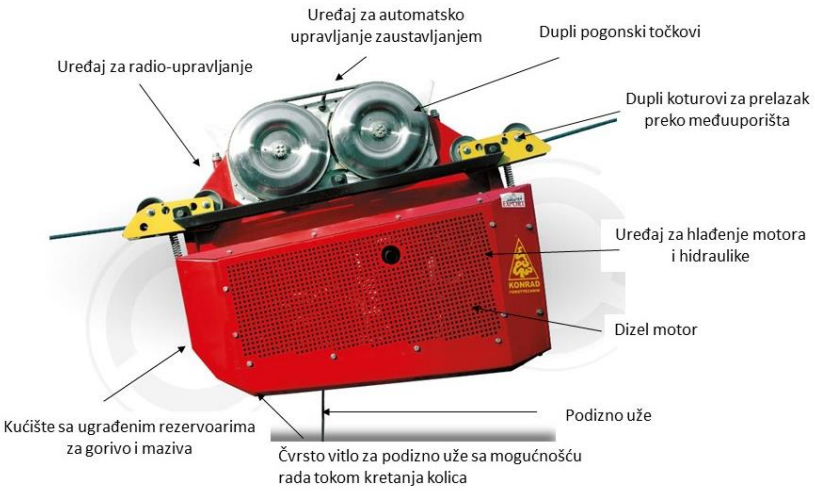
Savremene šumske žičare najčešće su opremljene nepomičnim nosećim užetom ili spuštajućim nosećim užetom. Kod ovih sistema spuštanje više nema ulogu spuštanja kolica radi vezivanja tereta, već služi za automatsko zatezanje užeta kako bi se smanjio ugib kod užeta opterećenog teretom.

Prema pogonu, šumske žičare se dijele na (Poršinsky i Stankić, 2005):

- Samovozna kolica,
- Šumske žičare s vlastitim pogonom postavljene na kamionima,
- Šumske žičare koje koriste pogon radne mašine na koju su priključene,
- Vučene šumske žičare s vlastitim pogonom na priključnim vozilima,
- Šumske žičare s vlastitim pogonom na saonicama.

Samovozna kolica koja imaju pogonski uređaj (motor) u svom kućištu funkcionišu na način da pogonski uređaj služi za pokretanje podiznog užeta i/ili za vuču kolica po nosećem užetu. Ovakvim kolicima se upravlja daljinski. Međutim, negativna strana ove konstrukcije je povećana masa kolica zbog pogonskog uređaja, što negativno utiče na nosivost. Samohodna kolica KONRAD Woodliner 3000 predstavljaju primjer takvog rešenja. Ova kolica imaju dizel motor sa snagom od 73,5 kW, što omogućava vučnu silu između 25 i 30 kN. Masa kolica iznosi 1170 kg, a mogu postići brzinu kretanja do 6 m/s. Woodliner 3000 koristi glavno uže prečnika 22 mm za transport, dok povratno uže ima prečnik 12 mm i dužinu od 80 metara. Dimenzije kolica su 1.650 mm dužine, 1.490 mm širine i 660 mm visine. Opremljena su snažnim vitlom koje može raditi tokom kretanja, a rezervoari za gorivo i ulje integrisani su u čvrstoj konstrukciji okvira. Kolica koriste KONRAD sistem daljinskog upravljanja sa mogućnošću "Distance automatic" rada, što omogućava poluautomatsku operaciju i visoku efikasnost na

terenu. Woodliner 3000 je posebno prilagođen za rad nizbrdo u kombinaciji sa mašinama kao što je Mounty, ali se koristi se i za horizontalni i transport uzbrdo (Slika 6.43).



Slika 6.43. Samohodna kolica WOODLINER 3000 (www.forsttechnik.at)

Žičare koje koriste pogon radne mašine na koju su priključene su sistemi, gdje se energija za rad žičare dobija iz pogona traktora ili drugih mašina. Ove žičare najčešće koriste snagu traktorskog priključka (PTO) za pokretanje vitla. Prednost ovih sistema je što ne zahtjevaju dodatni izvor energije, već koriste pogon mašine, čime se povećava mobilnost i efikasnost.

Tajfun je osnovan u Sloveniji i jedan je od vodećih proizvođača šumskih mašina, specijalizovan za vitla i žičare. Osnovan je u Sloveniji, a sad je već međunarodna kompanija. Tajfun MOZ 350 GR koristi sajlu dužine 350 m sa prečnikom od 18 mm i ima nosivost pri transportnoj brzini od 2.855 kg. Zahtjeva traktor sa minimalnom snagom od 80 konjskih snaga (PTO) i omogućava brzinu transporta do 4 m/s. Ukupna masa uređaja bez sajle iznosi 4.000 kg, a dimenzije su 3 m dužine, 2 m širine i maksimalna visina od 7,5 m (Slika 6.44).



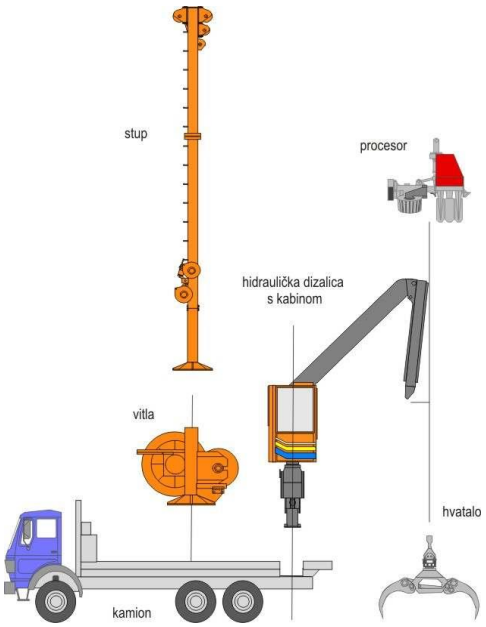
Sllika 6.44. Tajfun MOZ 350 GR žičara (www.tajfun.com)

Vrlo značajna i u širokoj upotrebi je konstrukcija šumskih žičara smještenih na kamionu. U ovom slučaju, na tovarnom prostoru kamiona postavljen je pogonski uređaj žičare, jarbol, kao i dodatna oprema, poput hidraulične ruke s kabinom. Hidraulična ruka može biti opremljena

uređajem za prihvat drveta ili procesorskom glavom, a cijeli sistem je moguće prilagođavati u skladu s potrebama i prema metodi sječe i izrade.

Ovakva konstrukcija omogućava kombinovanje iznošenja i izrade stabala kod stablovne metode izrade drveta, čime se značajno povećava produktivnost cijelog sistema eksploatacije šuma. Dodatno, hidraulična ruka omogućava slaganje drveta u složajeve unutar svog dohvata, čime se rješava problem brzog zatrpavanja na istovarnoj rampi pomoćnog stovarišta (Poršinsky i Stankić, 2005).

Ovaj koncept konstrukcije pruža fleksibilnost i efikasnost, omogućavajući operaterima da prilagode sistem specifičnim uslovima rada i potrebama na terenu, što rezultira optimizacijom radnih procesa i povećanjem ukupne produktivnosti pri eksploataciji šuma.



Slika 6.45. Kamionska žičara s procesorskom glavom (Stampfer, 2004)

Model žičare na kamionu Mounty MT50-2 kompanije Konrad Forsttechnik je specijalno razvijen za primjenu u šumarstvu. Ova mašina koristi inovativne sisteme za vuču i podizanje tereta. Mašina se montira na kamionsku platformu sa četiri osovine. Takođe, opremljena je naprednim sistemima daljinskog upravljanja, čime se omogućava bolja kontrola i smanjuje rizik od nesreća tokom rada.



Slika 6.46. MOUNTY MT50-2 kamionska žičara na Mercedes kamionu (www.forsttechnik.at)

Tabela 6.5. Tehničke specifikacije MOUNTY MT50-2 kamionske žičare (www.forsttechnik.at)

Karakteristika	
Vučna sila	47 kN
Visina jarbols	14,2 m
Dimenzije transporta	13,09 m (dužina) x 2,50 m (širina) x 4,00 m (visina)
Težina	31.000 - 35.000 kg
Glavno/noseće uže	Ø 22 mm, 800 m
Vučno uže	Ø 12 mm, 800 m
Uže za stabilizaciju	Ø 20 mm, 60 m
Pomoćno uže	Ø 7 mm, 1600 m
Dohvat dizalice	9,9 m
Obrtni moment dizalice	220 kNm
Hidraulički sistem	Aksijalne klipne pumpe, p_max 460 bara

Prema namjenskoj klasifikaciji terena za rad šumskih žičara (Ovende et al., 2001)., moguće je izdvojiti tri glavne kategorije:

- Tereni za isključivi rad sa šumskim žičarama: Ovo su šumske površine s nagibom terena većim od 25% i/ili tereni s izraženim površinskim preprekama. Ovi tereni su neprikladni za bilo kakvu drugu vrstu privlačenja drveta osim pomoću šumskih žičara.

- Prošireno područje rada šumskih žičara: Na ovim šumskim površinama moguće je privlačenje drveta i drugim sredstvima, ali se žičare koriste kao dodatna opcija zbog specifičnih uslova terena ili drugih faktora koji mogu otežati rad drugim sredstvima.

- Tereni na kojima je rad šumskih žičara ekološki pogodan: To su ravničarske šumske površine s niskom nosivošću zemljišta, što ograničava kretanje vozila. Na ovim

terenima posljedice privlačenja drveta su neprihvatljive, pa su šumske žičare ekološki prihvatljiva opcija.

Prema Samsetu (1985), tereni s nagibom većim od 20% smatraju se pogodnim za transport drveta šumskim žičarama, dok Heinimann (2004) definiše područje rada šumskih žičara kao terene s nagibom većim od 35%. Trzesniowski (1998) specifično određuje područje rada šumskih žičara s obzirom na smjer privlačenja drveta, navodeći da su tereni s nagibom većim od 20% pogodni za iznošenje drveta uzbrdo, dok su tereni s nagibom većim od 45% pogodni za iznošenje drveta nizbrdo. MacDonald (1999) ističe da su strma šumska područja s nagibom terena većim od 50% isključivo područja primjene žičara, dok Krpan (1997) dodaje da se na terenima manjeg nagiba odluka o primjeni žičara donosi na osnovu troškovne i ekološke prihvatljivosti.

Produktivnost šumskih žičara predstavlja ključni faktor u efikasnosti eksploatacije šuma ovom tehnologijom, ali zavisi od mnogobrojnih varijabli. Intenzitet sječe igra značajnu ulogu, ali je neophodno razmatrati ga u kombinaciji sa rasporedom i razmakom između postavljenih trasa žičare. Poseban izazov kod žičara je potreba za čestim premještanjem i ponovnim postavljanjem žičnih linija, što značajno utiče na ukupnu produktivnost. U tom kontekstu, sječna gustoća po dužnom metru žične linije postaje ključan parametar.

Pored toga, prosječna zapremina komada oblovine koja se transportuje takođe je od velike važnosti, budući da je direktno povezana s dimenzijama doznačenih stabala i metodama sječe i izrade. Na produktivnost utiču i tehničke i konstrukcione karakteristike same žičare, vremenski uslovi, iskustvo i motivacija radnika, veličina i položaj sječine, među ostalim faktorima. Nominalna produktivnost može značajno varirati zavisno od svih ovih uslova.
Zbog relativno visokih troškova nabavke i rada, kao i zbog brojnih faktora koji utiču na efikasnost, upotreba šumskih žičara zahtijeva pažljivo planiranje. Ovi izazovi su jedan od razloga zašto je upotreba žičara u Bosni i Hercegovini još uvijek u ranoj fazi razvoja.

6.5. Mašine za transport drvnog ostatka nakon sječe

Jedan od osnovnih problema sa transportom biomase su visoki troškovi, koji proizlaze iz niske gustoće, male vrijednosti i rasutog oblika materijala. Biomasa, kao što su grane, krošnje i ostaci drveća nakon sječe, zauzimaju veliku zapreminu u poređenju sa njenom masom, što rezultuje višim troškovima po jedinici transporta (Acuna et al., 2019). S obzirom na to da je biomasa relativno niske vrijednosti, troškovi transporta često mogu značajno uticati na ekonomsku isplativost čitavog procesa, posebno u udaljenim ili teško pristupačnim šumskim područjima. Uvijek je dobro izršiti kompakciju šumske biomase prije transporta (Yoshioka et al., 2002). Troškovi transporta biomase na udaljenosti od 30 do 42 kilometra mogu predstavljati značajan dio ukupnih troškova proizvodnje, često ekvivalentni 20% do 25% od ukupne vrijednosti (Börjesson i Gustavsson, 1996).

Mašine za transport drvnog ostatka nakon sječe omogućavaju efikasano prikupljanje i prevoz materijala koji ostaje nakon sječe drveća. Ovaj drvni ostatak, koji uključuje grane, krošnje i manje trupce, često se koristi za proizvodnju biomase ili dalje prerađuje. Za ove zadatke koriste se specijalizovane mašine poput traktorskih prikolica, forvardera, i nekad kamiona

opremljenih hidrauličnim dizalicama, tovarnim prostorom i sistemima za kompakciju tereta, što omogućava optimizaciju transportnog procesa.

Prikolice sa pokretnim stješnjivim stranicama omogućavaju efikasniju kompakciju biomase, čime se smanjuje obim materijala koji se transportuje, povećava se kapacitet tereta, i smanjuju troškovi transporta. Osim toga, ove prikolice smanjuju broj vožnji potrebnih za prenos biomase iz šume do mesta dalje obrade, čime se povećava produktivnost i smanjuje negativan uticaj na šumsko zemljište.

Savremeni forvarderi i skideri takođe imaju ključnu ulogu u transportu drvnog ostatka, jer su opremljeni kranovima i vitlima koja olakšavaju sakupljanje i premještanje materijala iz teško dostupnih šumskih područja.

Važan faktor u proizvodnji drvne sječke je efikasnost transporta i iskorišćenost tovarnog prostora kamiona i prikolica za prevoz. Težina 1 m^3 rasute sječke je ispod 200 kg (u poređenju sa masom 1 m^3 četinarskog drveta, što je oko 700 kg). Gustina nasipnog drvnog ostatka, potencijalno transportovanog za usitnjavanje do centralne lokacije za preradu, takođe je niska i kreće se oko 170 kg po 1 m^3.

Povećanje gustine drvnog ostatka, kao preduslov za efikasan transport, je veoma zahtjevan zadatak i teško izvodiv. Zbog toga se tehnologija zasnovana na mehanizovanom prikupljanju ostataka nakon seče, presovanju i stvaranju cilindričnih paketa (svežnjeva) vezanih kanapom može smatrati važnim pozitivnim zaokretom u rješavanju ovog pitanja (Cuchet et al., 2004). Primjer ove savremene tehnike je bandler (slush-bundler) John Deere 1490D, koji sakuplja ovrške drveća i grane koje su grupisane pored transportnih linija pri sječi drva harvesterima i izvozu forvarderima pomoću hidraulične dizalice stavlja ih u urežaj za presovanje. Uređaj za presovanje formira kontinualni, presovani i konopcem vezan cilindar granjevine, koji se mašinski siječe na snopove od oko 3 m dužine i 70 cm prečnika. Masa snopova je od 400 do 700 kg, a zapreminska masa se kreće od 350 do 600 kg/m^3.

Time se postiže znatno veće opterećenje vozila za transport i lakše rukovanje ostacima nakon sječe. Bandler skladišti snopove duž linije kretanja, a zatim se standardnim forwarderom transportuju do stovarišta pored puta gdje se iveraju, ili se transportuju dalje kamionima do centralnih stovarišta ili potrošača. S obzirom na oblik i gustoću formiranih snopova, kamionski skupovi se utovaraju na približno isti način kao i pri transportu trupaca. Na kamionski skup je moguće natovariti oko 65 snopova. U zavisnosti od vrste drveća i intenziteta sječe, sa 1 ha posječene površine može se formirati oko 70 snopova. Učinak bundlera je 10-30 snopova na sat, u zavisnosti od radnih uslova. Na mjestu potrošnje, snopovi se mogu direktno spaljivati u pogodnim pećima ili iverati. Prije toga, snopovi se mogu ostaviti da se prirodno prosuše.

John Deere 1490D Slash Bundler je specijalizovana mašina koja prikuplja i vrši kompakciju drvnog ostataka nakon sječe, optimizirajući transport biomase (Slike 6.47 i 6.48). Opremljena je John Deere 6068HTJ motorom snage 182,4 KS, sa obrtnim momentom od 780 Nm pri 1400 obrtaja u minuti. Dimenzije mašine iznose 12,05 m u dužini, 2,97 m u širini i 3,86 m u visini, dok je njena operativna masa 23.000 kg. Maksimalna brzina kretanja iznosi 22 km/h. Ova mašina ima kapacitet kompakcije biomase do 6.295 kg pri transportnoj brzini od 4 m/s. Ima hidraulični sistem kapaciteta od 140 litara.



Slika 6.47. Bundler John Deer 1490D i transport snopova forvarderom (www.foretvirtuelle.com)



Slika 6.48. Bundler John Deer 1490D montiran na kamion (Hakkila i Alakangas, 2001)

Traktorske ekipaže za transport šumske biomase su sistemi koji uključuju traktore opremljene prikolicama specijalno dizajniranim za prikupljanje, utovar i prevoz šumske biomase. Ova šumska biomasa može obuhvatati granje, ostatke od sječe, i druge oblike drvnog otpada koji se dalje koristi za proizvodnju energije ili druge svrhe. Traktori su često opremljeni hidrauličnim dizalicama za lakši utovar biomase. Prednosti ovih ekipaža se efikasan transport biomase sa teško pristupačnih terena, smanjenje uticaja na zemljište zahvaljujući prilagođenim gumama, kao i mogućnost kombinovanja sa priključnim uređajima poput iverača za usitnjavanje biomase direktno na terenu.

Često se koriste prikolice s pokretnim stješnjivim stranicama koje su dizajnirane tako da omogućavaju kompakciju šumske biomase direktno u vozilu tokom utovara (Slika 6.49). Ove pokretne stranice se pomjeraju uz pomoć hidraučnih klipova, što omogućava da se biomasa pritisne i stisne unutar prikolice, čime se maksimalno koristi njen kapacitet i smanjuje broj potrebnih transportnih ciklusa. Kompakcija biomase ne samo da povećava efikasnost transporta već i smanjuje rizik od rasipanja materijala tokom vožnje, što doprinosi smanjenju troškova i većoj produktivnosti na terenu.



Slika 6.49. Prikolica sa stješnjivim stranicama HavuHukka (Hakkila i Alakangas, 2001)

Prikolica sa stješnjivim stranicama može biti integrisana u forvarder, čime se značajno povećava efikasnost transporta drvnog ostatka i biomase u šumarskim operacijama. Forvarder opremljen ovakvom prikolicom omogućava ne samo sakupljanje i prevoz biomase, već i kompakciju tereta direktno na terenu, čime se optimizuje transportni kapacitet. Sistem je sličan traktorskoj ekipaži ali s većom pokretljivošću (Slika 6.50).



Slika 6.50. John Deere 1510G forwarder za transport biomase (www.ansteeservices.co.uk)

Forvarder sa iveračem i kontejnerom za transport biomase je multifunkcionalna mašina konstruisana da integriše sakupljanje, usitnjavanje i transport biomase u jednom radnom ciklusu. Drvni ostaci poput grana i krošnji se prikupljaju, usitnjavaju, a zatim direktno ubacuju u kontejner, čime se smanjuje potreba za dodatnim mašinama i transportnim ciklusima. Nakon što je kontejner napunjen, mašina prevozi sječku direktno do mjesta skladištenja ili prerade (Slika 6.51).



Slika 6.51. Forvarder s iveračem i kontejnerom za transport biomase (www.puuhuolto.fi)

Literatura:

Acar, H. H. (2013). Assessment of unit work time in logging operations the using of log pulling-sliding head during cable skidding of the logs by tractor power on steep terrain, Kastamonu Univ. Journal of Forestry Faculty, 13(1), 144-152.

Acuna, M., Sessions, J., Zamora, R., Boston, K., Brown, M., & Ghaffariyan, M. R. (2019). Methods to manage and optimize forest biomass supply chains: A review. Current Forestry Reports, 5, 124-141.

Akay, A. E. (2005). Using farm tractors in small-scale forest harvesting operations. Journal of Applied Sciences Research, 1(2), 196-199.

Ambike, S. S., & Schmiedeler, J. P. (2007). Application of geometric constraint programming to the kinematic design of three-point hitches. Applied Engineering in Agriculture, 23(1), 13-21.

Bembenek, M., Mederski, P. S., Erler, J., & Giefing, D. F. (2011). Results of large-size timber extracting with a grapple skidder. Acta Sci. Pol., Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar, 10(3), 5-14.

Bojanin, S., & Sever, S. (1987). Traktor. U Šumarska enciklopedija (Dio 2, str. 513–519). Zagreb: Jugoslavenski leksikografski zavod.

Börjesson, P., & Gustavsson, L. (1996). Biomass transportation. Renewable energy, 9(1-4), 1033-1036.

Borz, S. A., Marcu, M. V., & Cataldo, M. F. (2021). Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 forwarder prototype under conditions of steep-terrain low-access forests. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 42(2), 185-200.

Bosner, A., Nikolić, S., Pandur, Z., & Benić, D. (2008). Razvoj i umjeravanje prijenosnoga sustava za mjerenje osovinskih opterećenja vozila–mjerenja na forvarderu. Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, 29(1), 1-15.

Brunberg, T., (2004). Underlag till produktionsnormer för skotare (Productivity-norm data for forwarders). Skogforsk, Redogörelse 3: 1–12.

Conway, S., (1976) Logging practices. Principles of timber harvesting systems. Miller Freeman Publications, 1 – 432.

Cuchet, E., Roux, P., & Spinelli, R. (2004). Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France. Biomass and Bioenergy, 27(1), 31-39.

Dykstra, D. P., & Heinrich, R. (1996). FAO model code of forest harvesting practice. FAO.

Enache, A., Kühmaier, M., Visser, R., & Stampfer, K. (2016). Forestry operations in the European mountains: a study of current practices and efficiency gaps. Scandinavian journal of forest research, 31(4), 412-427.

Gilanipoor, N., Najafi, A., & Heshmat Alvaezin, S. M. (2012). Productivity and cost of farm tractor skidding. Journal of Forest Science, 58(1), 21-26.

Gregov, G. (2012). Prilog istraživanju modeliranja hidrostatske transmisije na šumskom vozilu Doctoral dissertation, University of Rijeka. Faculty of Engineering 1-171.

Gregur, J. (2015). Povijest mehanizacije u šumarstvu (Završni rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije. Preuzeto s https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:449616

Gülci, N., Akay, A. E., Erdaş, O., & Acar, H. H. (2017). Productivity Analysis of Chute System integrated with Portable Winch and Synthetic Rope for Uphill Logging Operation. European Journal of Forest Engineering, 3(2), 72-77.

Gulci, S. (2020). Productivity of a farm tractor with single drum winch during whole-tree timber extraction. Journal of Forestry Society of Croatia/Sumarski List Hrvatskoga Sumarskoga Drustva, 144.

Gužvinec, H., Zorić, M., Šušnjar, M., Horvat, D., & Pandur, Z. (2012). Utjecaj načina sidrenja na vrijednosti horizontalne sastavnice vučne sile i faktor prianjanja prilikom privitlavanja drva skiderom i adaptiranim poljoprivrednim traktorom. Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, 33(1), 23-33.

Hakkila, P., & Alakangas, E.A. (2001). Wood Energy Technology Programme. 1999-2002.

Han, H. S., & Kellogg, L. D. (2000). Damage characteristics in young Douglas-fir stands from commercial thinning with four timber harvesting systems. Western Journal of Applied Forestry, 15(1), 27-33.

Heinimann, H. R., (2004). Forest Operations under Mountanious Conditions. Encyclopedia of Forest Sciences, Volume 1, Elsevier Academic Press, 279 – 285.

Heinrich, R., (1987). Appropriate Wood Harvesting Applying Farm Tractors in Skidding and Forwarding Operations in Plantation Forest in Developing Operations. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Forestry Paper 78, p. 266, Rome.

Johansson, J. (1997). Small tree harvesting with a farm tractor and crane attached to the front. Journal of Forest Engineering, 8(1), 21-33.

Kellogg, L. D., Bettinger, P., & Studier, D. D. (1993). Terminology of ground-based mechanized logging in the Pacific Northwest.

Kincl, Z. (2022). Time study of an all-terrain vehicle (ATV) with a forwarding trailer in the Eagle Mountains in the Czech Republic. Journal of Forest Science (1212-4834), 68(7).

Konciner, D., (1988). Traktor-IMT 561, Traktor Caterpillar Challenger 65, Mehanizacija šumarstva 1988.

Košir, B., (1987) Vrste žičara i trendovi korišćenja žičnih naprava (Cable way types and the trends in cable system use). Mehanizacija šumarstva 12(3-4): 43-48.

Krpan, A. P. B. (1997). Poredba djelotvornosti žičare STEYR KSK 16 na brdskom terenu i ravnici (Vergleich der Wirksamkeit des Seilkrans STEYR KSK 16 am Steilhang und in der Ebene). Mehanizacija šumarstva, 22(2), 83–93.

Kühmaier, M., & Stampfer, K. (2010). Development of a multi-attribute spatial decision support system in selecting timber harvesting systems. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 31(2), 75-88.

Leszczyński, K., Stańczykiewicz, A., Kulak, D., Szewczyk, G., & Tylek, P. (2021). Estimation of productivity and costs of using a track mini-harvester with a stroke head for the first commercial thinning of a Scots pine stand. Forests, 12(7), 870.

Lindroos, O., & Wasterlund, I. (2011). Larger loads and decreased damage–the potential of a new forwarding concept. In: Ackerman, P., Ham, H., Gleasure, E. (eds.), Fourth Forest Engineering Conference: Innovation in Forest Engineering – adapting to structural change, (p. 166).

Lundbäck, M., Häggström, C., & Nordfjell, T. (2018, April). Worldwide trends in the methods and systems for harvesting, extraction and transportation of roundwood. In Proceedings of the 6th International Forest Engineering Conference, Rotorua, New Zealand (pp. 16-19).

MacDonald, A. J. (1999). Harvesting systems and equipment in British Columbia (p. 197). British Columbia, Ministry of Forests, Forest Practices Branch.

Magagnotti, N., & Spinelli, R. (2011). Financial and energy cost of low-impact wood extraction in environmentally sensitive areas. Ecological engineering, 37(4), 601-606.

Marčeta, D., Bilaković, Z., Petković, V., & Knežević, J. (2024). Productivity of HSM 208F forwarder in selective cutting and mountainous area. Radovi Šumarskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu, 54(1).

Marčeta, D., Maglica, J., Petković, V., & Čomić, D. (2024). Productivity of Timberjack 350A and Tree Farmer C5D skidders in group-selective cutting and assortment method. Šumarski list, 148(1-2).

Marenče, J., & Krč, J. (2016). Possibilities of using small tractors for forestry operations on private property. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 37(1), 151-162.

McEwan, A., Brink, M., & Van Zyl, S. (2013). 1.6 Guidelines for difficult terrain ground-based harvesting operations in South Africa. 3 Hon, 12, 26.

Mousavi, R., Naghdi, R. (2014). Comparison of productivity and cost of timber extraction by farm tractor, skidding vs. forwarding in Northern Iran. HortFlora Research Spectrum, 3(3), 201-210.

Mousavi, R., Nikoye Seyahkal, M., & Naghdi, R. (2013). Comparison of timber skidding using two ground-based skidding systems: grapple skidding vs. cable skidding. International Journal of Forest, Soil and Erosion (IJFSE), 3(3), 79-86.

Nikolić, S. (1990). Mehanizacija u šumarstvu, Šumarski fakultet Beograd, 201 p

Owende, P. M., Tiernan, D., Ward, S. M., & Lyons, J. (2001). Is there a role for cable extraction on low gradient sensitive sites? Proceedings of Workshop »New Trends in Wood Harvesting with Cable Systems for Sustainable Forest Management in the Mountains«, Joint FAO/ECE/ILO & IUFRO, 18– 24 June 2001, Ossiach (Austria), FAO, Rome, 227 – 234.

Özturk, T. (2007). Modifying farm tractors for forest harvesting operations. In International Symposium, Bottlenecks, Solutions and Priorities in the Context of Functions of Forest Resources.

Özturk, T. (2010). Productivity of New Holland farm tractor at beech stands on mountainous areas in Black Sea Region. Forestry Ideas, 16(1), 39.

Pandur, Z., Vusić, D., & Papa, I. (2009). Dodatna oprema za povećanje proizvodnosti forvardera. Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, 30(1), 19-25.

Pičman, D., T. Pentek, T. Poršinsky, 2001: Relation between forest roads and extraction machines in sustainable forest management. Proceedings of Workshop »New Trends in Wood Harvesting with Cable Systems for Sustainable Forest Management in the Mountains«, Joint FAO/ECE/ILO & IUFRO, 18 – 24 June 2001, Ossiach (Austria), FAO, Rome, 185 – 191.

Poršinsky, T. (2002). Productivity factors of Timberjack 1210 at forwarding the main felling roundwood in Croatian lowland forests. Glasnik za šumske pokuse: Annales Experimentis Silvarum Culturae Provehendis, 39, 103-132.

Poršinsky, T., & Stankić, I. (2005). Prilog poznavanju iznošenja drva šumskim žičarama. Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, 26(1), 39-54.

Proto, A. R., Macrì, G., Visser, R., Harrill, H., Russo, D., & Zimbalatti, G. (2018). Factors affecting forwarder productivity. European Journal of Forest Research, 137, 143-151.

Pulkki, R., 2004: Introduction to Cable Yarding and Terminology http://flash.lakeheadu.ca/repulkki/ctl_ft.html

Raymond, K. A., (1989). Mechanised shortwood thinning with forwarder extraction (Project Report 42). New Zealand Logging Industry Research Association, pp. 1–17.

Rocha, Q. S., Lima, R. C. A., Munis, R. A., Pereira, G., & Simões, D. (2022). Economic viability of the whole tree harvest under conditions of uncertainty: a study in southeastern Brazil. International Journal of Forest Engineering, 33(3), 181-188.

Russell, F., & Mortimer, D. (2005). A review of small-scale harvesting systems in use worldwide and their potential application in Irish forestry (p. 56). Dublin: COFORD.

Samset, I., 1985: Winch and cable sistems. Martinus Nijhoff/ DR W. Junk Publishers, Dodrechts/Boston/Lancaster, 1 – 539.

Savelli, S., Cavalli, R., Baldini, S., & Picchio, R. (2010). Small scale mechanization of thinning in artificial coniferous plantation. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 31(1), 11-21.

Sever, S. (1988). Proizvodnost i perfomanse forvardera u radovima privlačenja drva. Mehanizacija šumarstva 18(5–6): 59–87.

Sever, S., (1980) Istraživanje nekih eksploatacijskih parametara traktora kod privlačenja drva. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 301 p

Slamka, M., & Radocha, M. (2010). Results of harvesters and forwarders operations in Slovakian forests. Central European Forestry Journal, 56(1), 1-15.

Spinelli, R., & Magagnotti, N. (2011). The effects of introducing modern technology on the financial, labour and energy performance of forest operations in the Italian Alps. Forest Policy and Economics, 13(7), 520-524.

Spinelli, R., & Magagnotti, N. (2012). Wood extraction with farm tractor and sulky: estimating productivity, cost and energy consumption. Small-scale Forestry, 11(1), 73-85.

Spinelli, R., Magagnotti, N., Visser, R., & O'Neal, B. (2021). A survey of the skidder fleet of Central, Eastern and Southern Europe. European Journal of Forest Research, 140, 901-911.

Spinelli, R., Owende, P. M., Ward, S. M., & Tornero, M. (2004). Comparison of short-wood forwarding systems used in Iberia. Silva Fennica, 38(1), 85-94.

Staaf, K.A.G., Wiksten, N.A. (1984). Transports of timber in terrain. In: Tree harvesting techniques. Forestry Sciences, vol 15. Springer, Dordrecht.

Stampfer, K. (2004). Perspectives on whole tree cable yarding systems for thinning operations in Austria. International symposium »Cable Yarding Suitable for Sustainable Forest Management«. Slovenian Forestry Insitute, 23 September 2004, Idrija, Slovenia, 67 – 74.

Stankić, I. (2010). Višekriterijsko planiranje izvoženja drva forvarderima iz nizinskih šuma Hrvatske (Doktorska disertacija). Šumarski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 123 str.

Stankić, I., Poršinsky, T., Tomašić, Ž., Tonković, I., & Frntić, M. (2012). Productivity models for operational planning of timber forwarding in Croatia. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 33(1), 61-78.

Štícha, V., Holuša, J., Sloup, R., Macků, J., & Trombik, J. (2018). A mobile hydraulic winch for use in small-scale forestry. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 39(2), 205-212.

Šušnjar, M., Pandur, Z., Bačić, M., Lepoglavec, K., Nevečerel, H., & Kopseak, H. (2023). Possibilities for the Development of an Electric Hybrid Skidder Based on Energy Consumption Measurement in Real Terrain Conditions. Forests, 14(1), 58.

Tiernan, D., Owende, P. M. O., Kanali, C. L., Spinelli, R., Lyons, J., & Ward, S. M. (2002). Selection and operation of cable systems on sensitive forest sites. Project deliverable D2 of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), 1-73.

Tiernan, D., Zeleke, G., Owende, P. M. O., Kanali, C. L., Lyons, J., & Ward, S. M. (2004). Effect of working conditions on forwarder productivity in cut-to-length timber harvesting on sensitive forest sites in Ireland. Biosystems engineering, 87(2), 167-177.

Tinta, B. (1983). Istraživanje upotrebljivosti zglobnog traktora GV–50 BELT–Črnomelj. Mehanizacija šumarstva.

Trzesniowski, A. 1998: Wood transport in steep terrain. In Proceedings of the Seminar on „Environmentally sound forest roads and wood transport“, Joint FAO/ECE/ILO & IUFRO 17-22.

Tufts, R. A. (1997). Productivity and cost of the Ponsse 15-series, cut-to-length harvesting system in southern pine plantations. Forest products journal, 47(10), 39.

Tufts, R. A., & Brinker, R. W. (1993). Productivity of a Scandinavian cut-to-length system while second thinning pine plantations. Forest products journal, 43(11, 12), 24.

Varch, T., Erber, G., Visser, R., Spinelli, R., Harrill, H., & Stampfer, K. (2021). Advances in cable yarding: a review of recent developments in skyline carriage technology. Current Forestry Reports, 1-14.

Visser, R., & Stampfer, K. (2015). Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 36(2), 321-331.

WCB, 1999: Cable yarding systems handbook. Worker’s Compensation Bord of British Columbia, Lower Mainland, British Columbia, Canada, 1 – 180.

White, T., (2004). Factors Affecting Harvester and Forwarder Production. In: Making Cut-to-Length Logging Pay, FERIC. Kamploos, BC, Canada, pp. 1–30.

Yoshioka, T., Aruga, K., Sakai, H., Kobayashi, H., & Nitami, T. (2002). Cost, energy and carbon dioxide (CO 2) effectiveness of a harvesting and transporting system for residual forest biomass. Journal of forest research, 7, 157-163.

7. MAŠINE ZA DRUGU FAZU TRANSPORTA DRVETA

Transport drveta ima dugu istoriju, koja seže u daleku prošlost, prateći prve značajnije primjene drveta. Razvoj civilizacije i sve veća upotreba drveta kao građevinskog i konstrukcijskog materijala doveli su do potrebe za organizovanim iskorišćavanjem šuma i transportom drveta na veće udaljenosti. U početku, transport se obavljao uglavnom plovnim vodenim putevima i uz pomoć životinja. Ova praksa ostala je nepromijenjena dugo vremena, sve do 19. vijeka, kada se počinju koristiti željeznice s drvenim tračnicama i konjskom vučom. Krajem 19. vijeka dolazi do značajnog napretka u transportu drveta uvođenjem mehanizovane vuče i šumskih željeznica. Prema Brownu (1949), a kako navodi Zorić (2012), kamionski transport drveta eksperimentalno je uveden u Evropi 1909. godine, dok se njegova komercijalna primjena počela razvijati od 1913. godine (Zorić, 2012). Ove promjene označile su početak savremenog pristupa transportu drveta.

Transport drveta se obično dijeli u dvije glavne faze: unutrašnji i vanjski transport. Unutrašnji transport, poznat i kao faza primicanja i privlačenja drveta, obuhvata premještanje drveta od panja do stovarišta unutar granica šume. Ova faza uključuje radne operacije poput privlačenja, nošenja ili izvoženja drveta do mjesta gdje će biti privremeno skladišteno prije daljeg transporta. Vanjski ili daljinski transport, s druge strane, obuhvata premještanje drveta od šumskog stovarišta do konačnog odredišta, koje može biti pogon za preradu drveta, prodajno mjesto, krajnji potrošač i dr.

Transport generalno predstavlja premještanje robe sa jednog mjesta na drugo mjesto. Pri transportu drveta mjesta sa kojih se premješta drvo određena su mjestom sječe (panj), odnosno položajem stovarišta. Transport drveta ima karakteristike cikličnog rada, te se odvija u turnusima. Racionalizacija i optimizacija transporta drveta ogleda se kroz skraćenje vremena turnusa, i to najčešće smanjenjem distance transporta, povećanjem brzine kretanja transportnog sredstva, skraćenjem vremena utovara i istovara drveta te transportom što veće količine drveta unutar jednog turnusa (Mokhirev et al., 2004). Distanca kod primarnog transporta najviše zavisi od otvorenosti šuma, a kod sekundarnog transporta je određena položajem kupca. Brzina kretanja transportnog sredstva zavisi od tehničkih karakteristika sredstva, terenskih faktora, ekoloških i zakonskih ograničenja.

Daljinski transport drveta podrazumijeva premještanje drveta od pomoćnog stovarišta do krajnjeg odredišta, bilo da se radi o mjestu prerade, prodaji ili nekoj drugoj destinaciji. Ovaj proces je ključan dio lanca vrijednosti u šumarstvu, jer efikasan transport omogućava pravovremenu isporuku drvnih proizvoda, smanjenje troškova i povećanje profitabilnosti (Ghaffariyan et al., 2014). U zavisnosti od metoda iskorišćavanja šuma, transportovati se mogu definitivno izrađeni šumski drvni sortimenti, deblovina predviđena za doradu na stovarištu ili cijela stabla. Daljinski transport pretežno se odvija izvan područja šume na kojem je izvršena sječa. Transport drveta obuhvata nekoliko faza, a može se obavljati putem različitih transportnih sredstava, uključujući puteve, željeznicu, vazdušni i vodeni transport. Udaljenosti se kreću od nekoliko kilometara do više hiljada kilometara, u zavisnosti od vrste daljinskog transporta, odnosno od vrijednosti tovara. Za kraće udaljenosti prevoza služe kamioni, za veće

udaljenosti železnice, a najveće udaljenosti postižu se daljinskim transportom vodenim putevima.

7.1. Drumski transport - kamioni

Transport drveta putevima je najčešći oblik daljinskog transporta, posebno u regijama sa razvijenom putnom infrastrukturom. Kamioni opremljeni specijalnim prikolicama za prevoz drveta koriste se za prevoz od šumskih stovarišta do pogona za preradu ili krajnih kupaca. Prednosti ovog načina transporta uključuju fleksibilnost, brzinu i mogućnost direktne isporuke do odredišta. Međutim, transport putevima može biti ograničen sezonskim uslovima, kvalitetom puteva i zakonskim ograničenjima poput maksimalne dozvoljene mase i dimenzija vozila. Kako su zahtjevi za tačnom isporukom sirovina, kao i visokim kvalitetom i fleksibilnošću logistike prije pilana, postali sve važniji, kamionski transport je postao najvažniji način transporta na velike udaljenosti (Väkevä, 1999).

Transport drveta šumskim kamionima je završna faza iskorišćavanja. Zbog svojih karakteristika kao cikličnog rada, značajan dio pređene distance obavlja se s praznim vozilom. Pored toga, visoka cijena nabavke vozila, transport relativno malih količina jeftine robe, visoke cijene goriva i velika potrošnja goriva doprinose tome da je transport drva na velike udaljenosti šumskim kamionima izuzetno skup (Pandur et al., 2022).

Proizvođači kamiona generalno ne isporučuju kamione koji su fabrički dizajnirani za transport drveta. Zato se serijski proizvedeni kamioni modifikuju i nadograđuju specijalno za ovu namjenu. Osnovna konstrukcija takvog kamiona, koji zbog svoje specifične namjene prevoza trupaca može biti nazvan šumskim kamionom, uključuje instalaciju šumske nadgradnje, montažu šumske dizalice i udvajanje stražnje osovine (Slika 7.1).

Kamioni treba da budu snažni, sa poboljšanim tehničkim karakteristikama, sposobni da izdrže veće zahtjeve kretanja po teškim terenima, opremljeni sigurnim sistemima upravljanja i kočenja, te pogodni za transport glomaznog i teškog tereta. Zbog sve češće primjene deblovnog metoda u savremenom šumarstvu, sve više se koriste kamioni velike nosivosti, prilagođeni za prevoz duge oblovine, odnosno deblovine. Efikasnost troškova i fleksibilnost postaju sve važniji u logistici. Istovremeno, uslovi rada za transport na velike udaljenosti postaju sve zahtjevniji i promjenljiviji. S obzirom na to da se broj proizvoda od drveta povećao, a veličina sječina smanjila, tovari drveta moraju sve češće biti prikupljani sa nekoliko stovarišta, što povećava utrošak vremena i troškove kamionskog rada (Nurminen i Heinonen, 2007).

Efikasnost troškova i fleksibilnost transporta drveta obično se poboljšavaju optimizacijom ruta i resursa. Kako bi se smanjili troškovi i olakšalo planiranje nabavke drveta, Korpilahti (1989) je uveo model za dimenzionisanje voznog parka na osnovu zapremine tereta. Tehnike simulacije su takođe korišćene za analizu troškova transporta kao funkcije karakteristika vozila i puteva (McCormack 1990). Drugi istraživači su predložili smanjenje jediničnih troškova i efikasniju

alokaciju tokova drveta minimiziranjem udjela praznih vožnji (tj. vožnji bez tereta) primjenom metode povratnog transporta, gdje kamion prevozi teret do novog pogona pri povratku iz drugog, umjesto da putuje bez tereta (Carlsson i Rönnqvist 1998).

U posljednje vrijeme, interkompanijska saradnja u logistici drveta se takođe smatra kao mogući način za povećanje efikasnosti troškova transporta jer ovaj pristup pruža više mogućnosti za povratne vožnje (Forsberg 2003, Palander i Väätäinen 2005). Pored težnje za uštedom troškova u fazi transporta, napori su uloženi i u intenzivnu integraciju transporta drveta sa drugim procesima snabdijevanja drvetom, kao što je kontrola proizvoda proizvedenih preradom u šumi, s ciljem maksimiziranja neto profita (Arce i dr. 2002).

Transportna distanca u drugoj fazi transporta obično iznosi između 10 i 30 kilometara, a u nekim slučajevima može prelaziti 50 kilometara ili više. U pogledu troškova, kamionski transport je postao najvažniji za korišćenje šuma zbog veće pogodnosti pri utovaru i istovaru, čime je gotovo potpuno zamijenio željeznički transport. Takođe, kamioni imaju lakši pristup šumi u poređenju sa željeznicom. Mnogi faktori su doprinijeli povećanoj upotrebi kamiona, ali najvažniji je njihova fleksibilnost, odnosno sposobnost prilagođavanja tržišnim potrebama i zahtjevima potrošača.

Glavni faktori koji utiču na odluku o izboru tipa kamiona uključuju vrstu kolovoza, dužinu transportne distance, dužinu i vrstu sortimenata, kao i metodu iskorišćavanja šuma. Dužina sortimenata određuje dužinu kamiona, broj njegovih osovina i masu, kao i sistem utovara, vezivanja i potrebnu snagu motora. Vrsta sortimenata određuje da li će se koristiti kamioni sa stubovima nosačima (šticama) ili kamioni sandučari, koji se koriste za transport celuloznog ili ogrevnog drveta.

Tomašić i saradnici (2005) predlažu niz mjera za povećanje efikasnosti i smanjenje troškova u kamionskom transportu drveta. Jedan od ključnih pristupa je smanjenje ukupne mase kamiona, što omogućava povećanje korisne nosivosti. Ovo se može postići primjenom povoljnijih konstrukcijskih rješenja za šumarsku nadgradnju, uz upotrebu kvalitetnijih i lakših materijala.

Dodatno, zamjena dizalica lakšim modelima koji zadržavaju iste mogućnosti i tehničke performanse takođe doprinosi smanjenju mase. Odabir kamionskog skupa s lakšim komponentama i drugačije dizajniranim sklopovima predstavlja još jedno potencijalno rješenje. Efikasnost se može unaprijediti i uvođenjem kombinovanih metoda transporta, gdje se koriste kamionski skupovi sa i bez ugrađenih dizalica, čime se optimizuje organizacija i troškovi transporta.

Kada kamion vuče poluprikolicu, brzine kretanja su smanjene za približno 8-10%, dok vuča prikolice smanjuje brzine za oko 12%. Brzine kretanja praznog vozila obično su 30% veće od brzina natovarenog vozila. Prosječne brzine kretanja kamiona na mekanom zemljanom putu su veoma niske i iznose oko 10 km/h. U drugoj fazi transporta, zbog značajnih razlika u brzinama, razlikuju se optimalne distance prevoza u zavisnosti od vrste puta, koji mogu biti:

meki zemljani putevi, pošljunčani putevi, asfaltirani šumski putevi, asfaltirani lokalni putevi i magistralni putevi. Ovi faktori značajno utiču na efikasnost i ukupne troškove transporta drveta. Brzina kretanja vozila ne zavisi samo od tereta koji se prevozi, već i od kvaliteta i vrste puta. Kamioni koji se kreću po mekanim zemljanim putevima suočavaju se sa najvećim izazovima, što dovodi do smanjenja brzine i povećanja vremena potrebnog za prevoz. Nasuprot tome, asfaltirani putevi, bilo da su šumski, lokalni ili magistralni, omogućavaju znatno brže i efikasnije kretanje, smanjujući ukupne troškove i vrijeme transporta.

S obzirom na ove varijable, planiranje ruta i izbor odgovarajućih vozila postaju ključni elementi za optimizaciju transportnog procesa.Kamioni namjenjeni za transport drveta treba da imaju mogućnost ugradnje hidraulične dizalice, poluprikolicu ili prikolicu za štednju guma kada kamion ide prazan, i odgovarajući pod, odnosno nosače i stubove sa lancima za vezivanje tovara.

Transport drveta suočava se sa brojnim izazovima. Transportuje se velika zapremina relativno jeftinog tereta koji ne može podnijeti visoke troškove transporta. Zakonska regulativa dodatno ograničava produktivnost transporta drveta. Transport drveta ima sezonski karakter, sa vremenskim i saobraćajnim ograničenjima koja sprečavaju kontinuiran transport tokom cijele godine. Neujednačenost karakteristika oblog drveta, kao što su vrsta, gustoća, dimenzije i vlažnost, otežava nadzor nad utovarenim količinama. Oblik oblovine igra važnu ulogu u iskoristivosti tovarnog prostora vozila, jer zakrivljenost i nedovoljna obrađenost žilišta i kvrga mogu smanjiti efikasnost utovara.

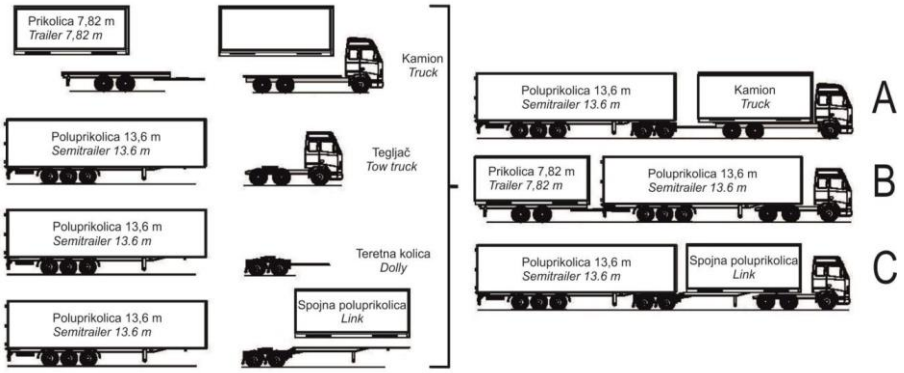
Gustoća drveta zavisi od vrste drveta i trenutnog sadržaja vlage. Prosječna gustoća drveta tvrdih lišćara s korom u sirovom stanju iznosi 1,1 t/m³, dok je za meke lišćare i četinare ta vrijednost približno 0,9 t/m³.



Slika 7.1. Kamion za transport drveta (https:www.palfinger.com)

Zakonodavni okvir Evropske unije jasno definiše dozvoljene dimenzije i mase za kamionski transport robe na daljinu između zemalja članica. Ipak, Švedska i Finska imaju izuzeće od ovih propisa zbog specifičnih klimatskih uslova i velikih udaljenosti koje roba mora preći. Zanimljivo je da su ove dvije zemlje i prije uvođenja zajedničkog zakonodavstva u EU same propisale maksimalne dimenzije kamionskih skupova na 24 metra dužine i ukupnu masu od 60 tona.

U većini ostalih zemalja članica, dozvoljene dimenzije su, kako prije, tako i nakon donošenja zajedničkih propisa, ograničene na 18,75 metara dužine i 40 tona ukupne mase (Zorić, 2012). Ovi standardi odražavaju različite potrebe i prilagođavanja uslovima transporta u pojedinim zemljama. Godine 1997. usvojen je propis koji dozvoljava povećanje dimenzija u kamionskom prevozu drva na 25,25 m dužine, odnosno povećanje ukupne mase na 60 t, ali isključivo ako se kamionski skup sastoji od vučnog i vučenog vozila koje propisuje i dozvoljava Evropski modularni sistem (European Modular System – EMS) (Slika 7.2)



Slika 7.2. Vozila evropskog modularnog sistema – EMS-a sa mogućim varijacijama; A) Kamion, teretna prikolica i poluprikolica; B) Tegljač, poluprikolica i prikolica; C) Tegljač, spojna poluprikolica i poluprikolica (Zorić, 2012)

Tabela 7.1. Prikaz zakonom dopuštenih dimenzija u nekim zemljama EU (Kjell i Westerlund, 2009)

Država	Dužina (m)[1]	Širina (m)[2]	Visina (m)	Masa (t)
EU standard	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	40/44[3]
Švedska	24/25,25[4]	2,60/2,55(2,60)[4]	4,50[5]	60
Finska	22/25,25[4]	2,60/2,55(2,60)[4]	4,20	60
Danska	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	48
Holandija	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	50
Italija	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	44
Luksemburg	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	44
Belgija	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	44
Češka	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	48
Francuska	16,50/18,75	2,55(2,60)	Nema ograničenja	40/44[3]
Irska	16,50/18,35	2,55(2,60)	4,25	40/44[3]
Velika Britanija	16,50/18,75	2,55(2,60)	Nema ograničenja	44
Norveška	17/18,50	2,55(2,60)	Nema ograničenja	50
Hrvatska[6]	16,50/18,75	2,55(2,60)	4,00	40/44[3]

1 Dužina kamiona s poluprikolicom/kamiona s prikolicom

2 Brojevi u zagradama predstavljaju dimenzije vozila s hladnjačom debljine stijenke 45 mm

3 ISO kontejner 44 tone

4 Kombinacija vozila po EMS-u

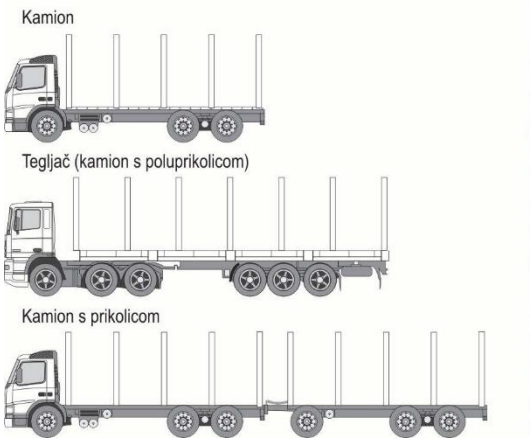
5 U Švedskoj ne postoji ograničenje visine, ali prepreke niže od 4,5 m moraju biti označene znakovima

6 Dimenzije preuzete iz Pravilnika o tehničkim uvjetima vozila na cestama, 2008: Narodne novine br. 51/10

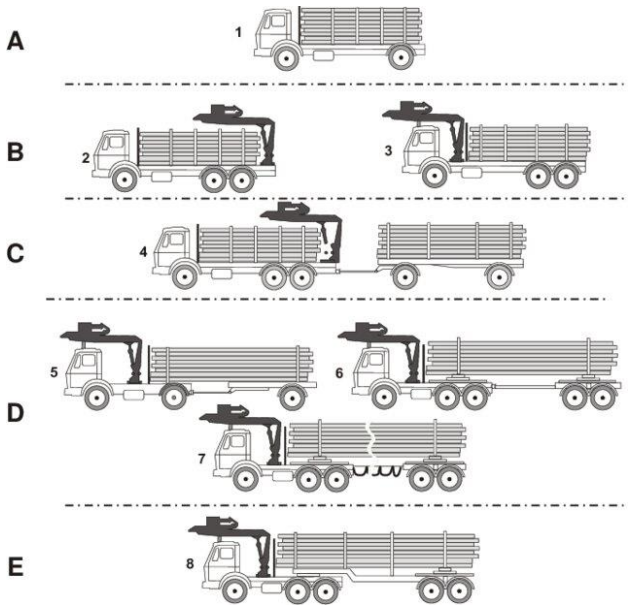
ETT-Modularni sistem za prevoz drveta razvijen je u Švedskoj od 2007. do 2011. godine kao inovativno rešenje za poboljšanje kamionskog prevoza. Cilj projekta, koji uključuje trideset različitih organizacija, je smanjenje emisije CO_2 i potrošnje goriva po prevezenoj toni. Sistem se zasniva na evropskom modularnom sistemu i uključuje tehničke inovacije kao što su upotreba lakših i čvršćih materijala, te specifična konfiguracija skupa koji omogućava prevoz veće količine korisnog tereta. Uklanjanjem dizalice smanjuje se početna masa sistema, dok se fleksibilnost i autonomnost rješavaju detaljnom organizacijom stovarišta i pomoćnim utovarnim uređajima. Upotreba vučenih vozila iz EMS-a omogućava brzae i jednostavna prilagođavanja kombinacija vozila prema kvaliteti puteva (Zorić, 2012).



Slika 7.3. Modularni sistem za transport drveta (Löfroth et al., 2012)



Slika 7.4. Tipovi kamiona (kamion, kamion s poluprikolicom, kamion s prikolicom)



Slika 7.5. Različiti sistemi kamiona za transport drveta (Šušnjar et al., 2011)

Kamioni prerađeni za prevoz drveta koriste se u šumarstvu već dugi niz godina. Osnova gradnje takvih kamiona, koji se zbog svoje isključive namene prevoza oblovine mogu nazvati šumskim kamionima, uključuje montiranje šumske nadogradnje, ugradnju šumske dizalice i udvajanje osovine. Razlike u vrstama šumskih nadgradnji kamiona najčešće su uzrokovane dužinama sortimenata, tako da su neke nadgradnje primerene kraćim dužinama oblovine (do 6 metara), dok se drugima može prevoziti i oblovina dužine do 12 metara (Šušnjar et al., 2011) (Slika 7.5).

Autonomnost i prilagodljivost šumskih kamionskih skupova postignuta je ugradnjom hidrauličnih dizalica, koje omogućavaju nezavisno obavljanje utovara i istovara. Tehničke specifikacije kamionskog skupa direktno utiču na njegove performanse, uključujući nosivost, brzinu, prohodnost, energetsku efikasnost i produktivnost pri manipulaciji teretom. Savremeni kamioni, uključujući šumske varijante, opremljeni su naprednim sistemima koji olakšavaju upravljanje i poboljšavaju ukupnu efikasnost, ali značajno povećavaju troškove nabavke. Dimenzije i kapacitet kamiona, koji su ključni za nosivost, takođe doprinose višoj cijeni ovih vozila. Kako bi se skratilo vrijeme potrebno za utovar i istovar, neophodne su moderne šumske dizalice, koje su, iako efikasne, prilično skupe. Zbog visokih troškova nabavke, šumski kamionski skupovi predstavljaju najskuplju komponentu u sistemu šumskog transporta. Produktivnost, čvrsto povezana s nosivošću, nije samo rezultat tehničkih karakteristika kamiona već je ograničena i zakonskim regulativama, na koje nije moguće lako uticati.

Sever je 1992 podijelio kamionske skupove na sljedeći način (Zorić, 2012) (Slika 7.5):

A – Šumski kamioni bez dizalice

1 – Šumski kamion bez dizalice

B – Šumski kamioni s dizalicom

2 – Šumski kamion s dizalicom montiranom nazad

3 – Šumski kamion s dizalicom montiranom naprijed

C – Šumski kamionski skup s prikolicom

4 – Šumski kamionski skup s prikolicom

D – Šumski kamionski skup s poluprikolicom

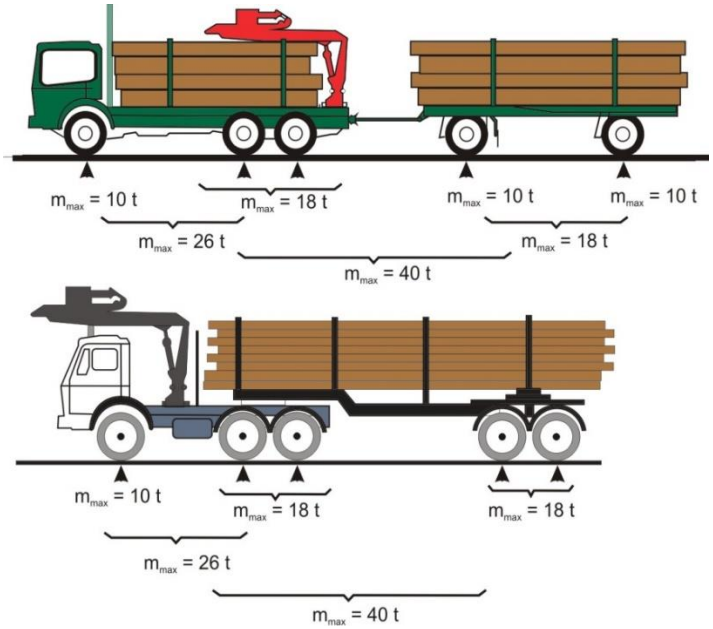
5 – Šumski kamionski skup s jednoosovinskom poluprikolicom

6 – Šumski kamionski skup s dvoosovinskom poluprikolicom

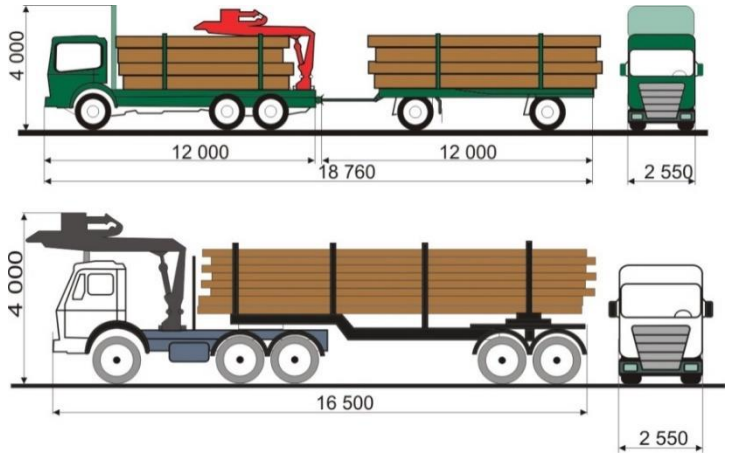
7 – Šumski kamionski skup s dvoosovinskom poluprikolicom bez rude

E – Šumski tegljački kamionski skup

8 – Šumski kamionski skup s tegljačkom dvoosovinskom poluprikolicom



Slika 7.6. Dopuštene mase kamiona i kamionskih skupova (Šušnjar et al., 2011)



Slika 7.7. Dopuštene dimenzije kamiona, prikolica i kamionskig skupa (Šušnjar et al., 2011)

Maksimalne dimenzije i osovinsko opterećenje kamiona u Bosni i Hercegovini, uključujući Republiku Srpsku, regulisane su Zakonom o osnovama sigurnosti saobraćaja na cestama i

relevantnim pravilnicima. Prema ovim propisima, standardne dimenzije za kamione su sledeće:

Dužina:

- Kamion sa poluprikolicom: do 16,50 m
- Kamion sa prikolicom: do 18,75 m

Širina:

- Standardna širina: 2,55 m
- Vozila sa hladnjačama: 2,60 m

Visina:

- Maksimalna visina: 4,00 m

Masa:

- Ukupna masa kamiona sa prikolicom: do 40 t, a u određenim slučajevima do 44 t.

Osovinsko opterećenje je takođe precizno regulisano kako bi se osigurala sigurnost u saobraćaju i smanjilo oštećenje puteva. Prema Pravilniku o dimenzijama, ukupnoj masi i osovinskom opterećenju vozila u Bosni i Hercegovini, maksimalno dozvoljeno osovinsko opterećenje je regulisano kako slijedi:

- Pojedinačna osovina: Maksimalno opterećenje iznosi 10 t.
- Pogonska osovina: Maksimalno opterećenje iznosi 11,5 t.
- Udvojene osovine:
  - ✓ Za osovine sa međusobnim rastojanjem manjim od 1 m, maksimalno opterećenje iznosi 11,5 t.
  - ✓ Za osovine sa međusobnim rastojanjem većim ili jednakim od 1 m, a manjim od 1,3 m, maksimalno opterećenje iznosi 16 t.

Jednoosovinske poluprikolice imaju masu oko 2000 kg, a masa tereta koja se na njih smije tovariti iznosi oko 8000 kg. Dvoosovinske prikolice imaju masu oko 3500 kg, a masa tereta koja se na njih može tovariti iznosi oko 12500 kg.

Kamioni se dijele prema nosivosti na (Nikolić, 1990):

- Laki (do 12 tona bruto),
- Srednje teški (od 12 do 16 tona bruto),
- Teški (preko 16 tona bruto).

Dužina vozila mora biti prilagođena tehničkim karakteristikama puta: maksimalnom nagibu, poprečnom nagibu, poluprečniku krivine i proširenju u krivini. Prema obliku i namjeni tovarnog prostora, kamioni mogu imati sandučasti tovarni prostor ili specijalnu nadgradnju za prevoz oblovine. Prvi se upotrebljavaju uglavnom za transport materijala u rasutom stanju. Neki kamioni imaju ugrađen hidraulični uređaj za dizanje tovarnog patosa (nazad ili bočno), te se nazivaju samoistovariči (kiperi).

Tabela 7.2. Specifikacije različitih izvedbi kamiona za transport drveta

Specifikacija	Scania R500 + Palfinger Epsilon M12Z (zadnja dizalica)	Volvo FH16 + Hiab Loglift 118S (tegljač)	Mercedes-Benz Arocs 3251 (transport sječke)
Proizvođač	Scania	Volvo	Mercedes-Benz
Model kamiona	R500	FH16	Arocs 3251
Snaga motora	500 KS	550 KS	510 KS
Tip nadgradnje	Prikolica za oblo drvo s dizalicom na zadnjoj strani	Tegljač s dizalicom	Kamion s tovarnim prostorom za sječku
Maksimalna nosivost	25 tona	24 tone	26 tona
Dužina nadgradnje	6 metara	N/A	7 metara
Dizalica	Palfinger Epsilon M12Z	Hiab Loglift 118S	N/A
Doseg dizalice	10 metara	9.5 metara	N/A
Kabina	Highline	Globetrotter XL	BigSpace
Pogon	6x4	6x2	6x6
Zapremina motora	12.7 litara	16.1 litara	12.8 litara
Euro norma	Euro 6	Euro 6	Euro 6



Slika 7.8. Kamion s dizalicom Palfinger Epsilon M12Z (https://www.pk.hr/)



Slika 7.9. Kamion za transport drvne sječke (https://roadstars.mercedes-benz-trucks.com/)

7.1.1. Dizalice za utovar drveta na kamionu

Dizalice za kamione su važna komponenta u transportu različitih vrsta tereta, uključujući drvo, građevinske materijale, i druge teške ili glomazne predmete. Dizalice omogućavaju efikasan utovar i istovar, povećavajući produktivnost i sigurnost operacija. Postoji nekoliko vrsta dizalica koje se koriste u kamionima, svaka sa specifičnim tehničkim karakteristikama koje ih čine pogodnim za određene zadatke.

- Hidraulične dizalice: Koriste hidrauličku tečnost pod pritiskom da bi podizale teret. Vrlo su prilagodljive i mogu se montirati na različite tipove kamiona. Njihova glavna prednost je visoka nosivost i mogućnost preciznog upravljanja.
- Zglobne dizalice: Imaju zglobni kran koji se može savijati i produžavati, što omogućava dosezanje teško dostupnih mesta. Zglobne dizalice su idealne za rad u urbanim područjima ili na mjestima gde je prostor ograničen.
- Telescopske dizalice: Imaju teleskopsku ruku koja se može izvlačiti i uvlačiti. To im omogućava da dosegnu veće visine i daljine, što je važno za rad na šumskim stovarištima
- Stacionarne dizalice: Montirane na fiksnoj poziciji na kamionu i nisu dizajnirane za pomjeranje. Obično se koriste za specifične zadatke koji zahtevaju konstantnu poziciju dizalice, kao što je utovar i istovar u skladištima.

Tehničke karakteristike dizalica za kamione variraju u zavisnosti od vrste dizalice i njene namjene. Neke od ključnih karakteristika su:

- Nosivost: Ovo je maksimalna težina koju dizalica može podići. Nosivost se mjeri u tonama i ključna je karakteristika za određivanje odgovarajuće dizalice za specifične zadatke.
- Doseg: Doseg dizalice se odnosi na maksimalnu dužinu do koje dizalica može dosegnuti. Telescopske dizalice obično imaju veći doseg u poređenju sa zglobnim dizalicama.
- Rotacija: Neke dizalice imaju mogućnost rotacije za 360 stepeni, što omogućava veću fleksibilnost pri radu.
- Snaga: Snaga hidrauličnog sistema ili motora dizalice određuje koliko brzo i efikasno dizalica može raditi.
- Masa dizalice: Ovo je važan faktor koji utiče na ukupnu masu kamiona i njegovu stabilnost prilikom rada.
- Kontrole: Moderne dizalice često imaju napredne kontrolne sisteme koji omogućavaju precizno upravljanje putem daljinskog upravljača ili kompjuterskih sistema.

Kamioni za transport drveta i drugih teških tereta često su opremljeni dodatnom opremom koja povećava njihovu funkcionalnost i efikasnost. Neka od ovih dodataka uključuju:

- Daljinski upravljači: Omogućavaju operatorima da upravljaju dizalicom sa sigurne udaljenosti, povećavajući sigurnost i preciznost rada.
- Stabilizatori: Hidraulični stabilizatori koji se šire iz kamiona kako bi povećali stabilnost tokom podizanja teških tereta.
- Automatski sistemi za podizanje i spuštanje: Ovi sistemi omogućavaju brzo i efikasno podizanje i spuštanje tereta, smanjujući vreme utovara i istovara.
- Zaštitne kabine: Kabine za operatore koje pružaju zaštitu od vremenskih uslova i poboljšavaju sigurnost tokom rada.

Poznati proizvođači dizalica koje se često koriste na šumskim kamionima su: Palfinger, Hiab, Fassi, Kesla, Loglift i dr.

Tabela 7.3. Tehničke karakteristike tri modela dizalica

Proizvođač	Model	Maksimalni domet	Nosivost na maksimalnom dometu	Maksimalna nosivost	Masa dizalice	Kapacitet hidraulične tečnosti	Maksimalni pritisak	Rotacija dizalice
Palfinger	EPSILON Q17Z96	9.6 m	1,450 kg	17,000 kg	2,350 kg	150 l	350 bar	425°
Hiab	X-HiPro 558	10.2 m	1,700 kg	18,000 kg	2,520 kg	200 l	320 bar	400°
Loglift	125S	10.0 m	1,600 kg	18,500 kg	2,400 kg	180 l	330 bar	415°

7.2. Željeznički transport

Transport drveta željeznicom je efikasan način prevoza velikih količina drveta na velike udaljenosti. Željeznički transport ima nekoliko prednosti, uključujući visoku nosivost, niže troškove po toni-kilometru u poređenju s cestovnim transportom i manji uticaj na okoliš. Međutim, ovaj oblik transporta zahtijeva prisustvo željezničke infrastrukture u blizini šumskih stovarišta i odredišta, što može biti ograničavajući faktor.

U Bosni i Hercegovini postoji značajna istorija upotrebe željeznica u transportu drveta. Eksploatacija šuma željeznicom imala je ključnu ulogu u razvoju šumarske industrije u Bosni i Hercegovini tokom perioda austrougarske uprave. Nakon okupacije Bosne i Hercegovine 1878. godine, Austro-Ugarska je započela intenzivnu eksploataciju šuma kako bi iskoristila bogate prirodne resurse, posebno za proizvodnju željezničkih pragova potrebnih za izgradnju željezničkih linija.

Izgradnja željezničkih pruga, kao što su Dobrljin-Banja Luka, Bosanski Brod-Sarajevo, Sarajevo-Metković, i mnoge druge, omogućila je efikasan transport drveta iz šumskih kompleksa do pilana i dalje prema tržištima. Najveći šumski kompleksi koji su eksploatisani uključuju Grmeč, Crnu Goru, Šator, Vijenac, Risovac, Plješevicu, Pastrijevo, Šišu, Palež, Čemernicu i Manjaču.

Problem pristupa tim šumskim područjima riješen je izgradnjom šumskih željezničkih pruga, žičara i čekrka, koji su omogućili spuštanje drvne mase do dolina rijeka poput Drine, Ribnika, Sanice i Sane, odakle je drvo splavareno do pilanskih postrojenja.

Eksploatacija šuma bila je organizovana kroz dugoročne ugovore sa stranim kapitalističkim preduzećima, što je dovelo do stvaranja mnogih kompanija kao što su Bosanska šumska industrija a.d. Otto Steinbeis, Bosanska šumska industrija Eisler & Ortlieb, i Šumska industrija G. Gregersen & Söhne. Ove kompanije su u velikoj mjeri doprinijele razvoju infrastrukture za transport drveta, uključujući izgradnju oko 346 km željezničkih pruga na lokomotivski pogon i 80 km gravitacionih pruga.

Vozni park sastavljen od 24 lokomotive na parni pogon i oko 1300 vagona za transport drveta i drugog materijala omogućio je efikasan transport velikih količina drveta. Po završetku Prvog svjetskog rata, vlasništvo nad ovim infrastrukturnim objektima prešlo je na Kraljevinu SHS, a kasnije i na Jugoslaviju, što je omogućilo nastavak korišćenja izgrađene infrastrukture za

potrebe šumarske industrije. Austrijska uprava je za 35 godina uspjela posjeći oko 18,5 miliona m^3 drveta, što je predstavljalo značajan doprinos ekonomiji i razvoju transportnih kapaciteta. Nakon Drugog svjetskog rata, sva imovina je nacionalizovana i uključena u sistem Jugoslovenskih Državnih Željeznica, čime je nastavljen transport drveta sve do ukidanja pruga 1976. godine. Ovaj period eksploatacije šuma željeznicom ostavio je dubok trag u historiji šumarstva Bosne i Hercegovine, a infrastruktura izgrađena tokom tog vremena korišćena je decenijama kasnije, doprinoseći razvoju industrije i ekonomije u regionu.

Prevoz drveta željeznicom vezan je za mrežu željezničkih pruga koje su sastavni dio međunarodnih transportnih koridora. Iz razloga što svaka država subvencioniše transport željeznicom domaće proizvodnje, prevoz drveta ovim sustavom moguć je na veće udaljenosti. Utovar drveta u vagone isključivo je moguć na željezničkim stanicama, pa cijeli sustav daljinskog transporta drveta ima tijek: utovar drveta na pomoćnom stovarištu u kamion ⇒ prevoz drveta kamionom do željezničke stanice ⇒ istovar drveta kamionom u željeznički vagon (ili istovar drveta na međustovarište smješteno na željezničkoj stanici sa naknadnim utovarom u vagon drugim sredstvom rada, odnosno naknadnim utovarom drva u vagon kamionskom dizalicom).

Transport drveta željeznicom u Bosni i Hercegovini je manje u upotrebi danas nego ranije zbog nekoliko ključnih faktora:

- Razgradnja i nedostatak ulaganja u infrastrukturu: Skoro sve željezničke pruge koje su korištene za transport drveta tokom austrougarskog perioda i kasnije su napuštene ili zatvorene.
- Fleksibilnost cestovnog transporta: Kamioni nude veću fleksibilnost u pogledu ruta i vremena transporta. Za razliku od željeznice, kamioni mogu pristupiti udaljenim šumskim područjima i direktno dostaviti drvo do pilana ili tržišta bez potrebe za dodatnim prevozom do i od željezničkih stanica.
- Jačanje putne infrastrukture: Izgradnja i poboljšanje putne infrastrukture učinili su transport mnogo efikasnijim i privlačnijim za prevoznike. Mnoge šumski putevi su prilagođeni za kamionski prevoz, čime se smanjuje potreba za korištenjem željeznice.
- Troškovi i efikasnost: Iako je željeznički transport često jeftiniji po toni-kilometru, ukupni troškovi uključujući utovar, istovar i prevoz do željezničke stanice mogu biti viši nego kod cestovnog transporta. Kamioni omogućavaju direktniji i često brži transport, što smanjuje ukupne logističke troškove.
- Promjene u zakonodavstvu i subvencijama: Državne subvencije za željeznički transport su smanjene ili ukinute, što je dodatno uticalo na pad korištenja željeznice za transport drveta. Bez subvencija, željeznički transport postaje manje konkurentan u odnosu na cestovni transport.
- Tehnološki napredak u kamionskom transportu: Razvoj novih tehnologija u kamionskom transportu, poput naprednih kamionskih dizalica i specijalizovanih prikolica za prevoz drveta, dodatno je unaprijedio efikasnost cestovnog transporta.

Korišćenje željeznica za transport drveta u svijetu je značajan, ali relativno specifičan segment logistike koji zavisi od nekoliko ključnih faktora kao što su dostupnost infrastrukture, troškovi, ekonomska isplativost i ekološki uticaj. U mnogim dijelovima svijeta, transport drveta željeznicom predstavlja održivu alternativu cestovnom transportu, posebno u regijama s razvijenom željezničkom mrežom.

U Sjedinjenim Američkim Državama, željeznički transport igra ključnu ulogu u prevozu drveta iz šuma do pilana i drugih prerađivačkih postrojenja. Prednosti uključuju visoku nosivost vozova, smanjenje troškova prevoza po toni-kilometru i manji uticaj na okoliš u poređenju sa cestovnim transportom. Međutim, troškovi ulaganja u željezničku infrastrukturu i održavanje mogu biti visoki, što često ograničava upotrebu ovog načina transporta na regije gdje su šume blizu željezničkih pruga. U SAD-u, željeznički transport postaje konkurentan kamionskom transportu na udaljenostima većim od 200 km (Gronalt i Rauch, 2018).

U Evropi, posebno u zemljama poput Švedske i Finske, željeznice su integralni dio lanca snabdijevanja drvnom masom. Švedska ima razvijenu mrežu šumskih željeznica koje se koriste za efikasan transport drveta. U Finskoj, željeznički transport drveta je takođe uobičajen, s obzirom na velike šumske površine i potrebu za transportom velikih količina drveta do industrijskih centara. Finske željeznice koriste specijalizovane vagone za prevoz drveta kako bi se smanjili troškovi i povećala efikasnost transporta. Željeznički transport drveta omogućava transport velikih količina, sa smanjenjem troškova i emisija CO2. Studije pokazuju da je transport željeznicom ekonomski isplativ za udaljenosti preko 145-160 km, zavisno o vrsti biomase. U Švedskoj, oko 15% oblog drveta se transportuje željeznicom, dok u Finskoj željeznica čini 23% ukupnog transportovanog drveta (Väätäinen et al., 2021).

U Australiji, željeznički transport drveta je takođe prisutan, ali u manjem obimu u poređenju sa cestovnim transportom. Razvoj šumskih željeznica u ovoj zemlji je ograničen geografskim i infrastrukturnim izazovima, ali tamo gdje je prisutan, željeznički transport pruža pouzdan i ekonomičan način prevoza drvne mase do prerađivačkih postrojenja i izvozne luke.

U Kanadi, željeznički transport drveta je važan, posebno u provincijama Britanska Kolumbija i Kvebek, koje imaju velike šumske resurse i razvijenu željezničku infrastrukturu. Kanadske nacionalne željeznice (CN) i Kanadske pacifičke željeznice (CP) pružaju usluge prevoza drveta, što omogućava efikasan transport velikih količina drveta na velike udaljenosti (The Timber Transport Forum).

U Ujedinjenom Kraljevstvu, željeznički transport drveta je manje uobičajen nego u nekim drugim evropskim zemljama. Međutim, postoje inicijative i projekti usmjereni na povećanje upotrebe željeznica za transport drveta, posebno u Škotskoj, gdje se ulažu napori u modernizaciju infrastrukture i razvoj novih logističkih rješenja kako bi se smanjio pritisak na cestovnu mrežu i povećala održivost transporta (The Timber Transport Forum) (The Timber Transport Forum).

U intermodalnim transportnim lancima, terminali su ključni za pružanje dobrih usluga (Gunnarsson et al,. 2004). Potrebna je velika skladišna površina kako bi se obezbedilo brzo utovaranje i istovaranje materijala (Rauch i Gronalt 2010). Lanci snabdevanja koji uključuju terminale povećavaju dostupnost tokom cele godine i osiguravaju sigurnost snabdjevanja (Ranta et al., 2012) i smatraju se preduslovom za ispunjavanje industrijske potražnje za

drvetom. Pored pretovara, železnički terminal može ispunjavati dodatne logističke funkcije ili usluge i stoga se terminali razlikuju po lokaciji, skladišnom kapacitetu i specifičnim uslugama koje pružaju (Kons et al., 2014). Optimalni skladišni kapacitet terminala određuje se sezonalnošću snabdjevanja drveta i industrijske potražnje, što dovodi do minimalne količine drveta skladištenog u određenom periodu godine kako bi se osigurala sigurnost snabdevanja.

Ako je u lanac snabdijevanja oblim drvetom uključen dodatni drumski transport (npr. bez željezničkih sporednih kolosijeka), tačka rentabilnosti željezničkog transporta u poređenju sa direktnim kamionskim transportom nije postignuta sve dok udaljenost ne prelazi 300 km (Chesneau et al., 2012). Kritični faktori uspjeha za željezničke terminale pokazali su se kao dužina kolosijeka za utovar, kapacitet i karakteristike skladišnog prostora (Ranta i dr. 2012), broj vozova koji se šalju nedeljno i iskorišćenje maksimalne nosivosti za svaki voz ili vagon (Wolfsmayr et al., 2016). Nadalje, čekanje kamiona u slučaju naglih skokova u snabdijevanju (npr. zbog poremećaja poput oluja) pokazalo se kao glavna uska grla u logistici terminala (Wolfsmayr et al., 2016).

Generalno, željeznički transport drveta predstavlja održivu i efikasnu opciju za prevoz velikih količina drveta na velike udaljenosti. Međutim, njegova primjena zavisi od specifičnih regionalnih uslova, uključujući dostupnost infrastrukture, troškove ulaganja i operativne troškove, kao i ekološke benefite koje pruža u poređenju sa alternativnim načinima transporta.

Najvećim dijelom prevoz drveta željeznicom vezan je uz izvoz prostornog višemetarskog drva (oko 300 000 m³/godišnje) u Italiju, odnosno Austriju, gdje pogoni preradbe drva (kupac) imaju mogućnost prihvata željezničkih vagona. Trošak prevoza drva željeznicom kreće se u rasponu od 50 – 80 HRK/m³ ovisno o udaljenosti transporta.



Slika 7.10. Željeznički terminal za utovar drveta (www.railfreight.com)

RGS vagon, ili Robni Gornji Sanduk vagon, je specijalizovani željeznički vagon dizajniran za transport rasutih materijala, uključujući drvo. Ovi vagoni su opremljeni otvorenim sandukom koji omogućava lak utovar i istovar robe. Zbog svoje konstrukcije, RGS vagoni su idealni za prevoz materijala koji ne zahtevaju zaštitu od vremenskih uslova, poput drva, uglja, rude, i slično. Njihova dužina, širina i visina variraju u zavisnosti od specifičnog modela, ali su generalno prilagođeni za efikasan utovar i istovar, često korišćenjem mehaničkih sredstava poput dizalica ili traka. U kontekstu transporta drveta, RGS vagoni omogućavaju fleksibilnost u prevozu različitih vrsta i oblika drveta. Njihova otvorena struktura omogućava lak pristup i

efikasno korišćenje prostora, što je ključno za optimizaciju logističkih procesa u drvnoj industriji. Uprkos modernizaciji i uvođenju novih tipova vagona, RGS vagoni i dalje zadržavaju svoju relevantnost zbog svoje jednostavnosti i efikasnosti u upotrebi.

Kapacitet utovara drva u RGS vagon, koji ima neto masu od 21 t, određen je sljedećim specifikacijama:

- Najveća dopuštena masa utovarenog tereta je 31 t.
- Neto zapremina vagona iznosi 72 m^3.
- Neto tlocrtna površina vagona je 36 m^2.
- Neto dužina vagona je 12,7 m.
- U zavisnosti od trenutne vlažnosti pojedine vrste drva, koja određuje njegovu gustinu, obim utovarenog drva kreće se od 30 do 35 m^3 po vagonu.

Zbog dužine vagona od 12,7 m, najpovoljnije dužine višemetarskog prostornog drva su 3 m, 4 m i 6 m. Zbog zakrivljenosti višemetarskog drveta, koja umanjuje iskoristivu dužinu utovarnog prostora vagona, prilikom utovara u vagon dolazi do potrebe za radnikom koji prerezuje drvo.

Vagoni sa stubovima za transport oblog drveta su specijalno dizajnirani za sigurno i efikasno prevoženje dugih komada, kao što su trupci. Ovi vagoni imaju karakteristične vertikalne stubove postavljene uzduž stranica vagona, koji drže trupce na mjestu i sprečavaju njihovo pomjeranje tokom transporta. Nosivost vagona je oko 50 tona, a dužina se kreće između 15 i 24 metra, dok je širina oko 3 metra. Neto zapremina vagona može biti od 60 do 100 m^3, zavisno od modela i konfiguracije stubova. Vagoni su opremljeni sa nekoliko redova vertikalnih stubova, koji mogu biti fiksni ili pomični, omogućavajući prilagođavanje različitim vrstama i veličinama drveta. Pod vagona je obično izrađen od čelika, sa dodatnim ojačanjima za stabilnost tokom utovara i transporta. Vagoni imaju ugrađene sisteme za pričvršćivanje i osiguranje tereta, poput lanaca, kaiševa ili kablova, kako bi se obezbijedila stabilnost i sigurnost drva tokom transporta. Dizajn vagona omogućava brz i efikasan utovar i istovar, često korišćenjem mehaničkih sredstava poput dizalica i viljuškara. Broj stubova se kreće od 12 do 16, a sistem za osiguranje tereta može biti lanac, kabl ili kaiš.

7.3. Vazdušni transport

Transport drva vazduhom uz pomoć letjelica poput helikoptera ili zepelina predstavlja pristup koji se koristi u specifičnim situacijama gdje konvencionalni načini nisu adekvatni. Ovaj način transporta, iako skuplji, donosi određene prednosti u područjima koja su nepristupačna za kamione ili željeznicu.

Helikopteri se često koriste za prevoz drveta iz teško dostupnih šumskih područja. Oni omogućavaju brži i fleksibilniji transport u poređenju s tradicionalnim metodama, posebno u planinskim predjelima gdje su putevi rijetki ili nepostojeći. Helikopterski transport drva može smanjiti uticaj na okoliš jer izbjegava potrebu za izgradnjom putne infrastrukture koja može izazvati eroziju tla i degradaciju staništa.

Zepelini, ili lebdjelice, predstavljaju još jedan alternativni način transporta drveta, koji je naročito koristan za velike količine tereta. Zepelini imaju prednost u vidu velike nosivosti i mogućnosti prevoza teških i glomaznih tereta na velike udaljenosti bez potrebe za specijalizovanom infrastrukturom. Zepelini mogu značajno smanjiti emisije CO_2 u poređenju s kamionima, jer koriste helijum ili vodik za letenje, što ih čini ekološki prihvatljivijima.

Pored helikoptera i zepelina, u posljednje vrijeme se razmatraju i druge vrste letjelica, uključujući bespilotne letjelice (dronove) velikog kapaciteta za prevoz drva. Ove tehnologije su još uvijek u fazi razvoja, ali pokazuju veliki potencijal za smanjenje troškova i povećanje efikasnosti transporta drveta u budućnosti.

7.3.1. Helikopterski transport

Helikopterski transport ili helisječa drveta predstavlja vazdušnu metodu iskorišćavanja šuma u kojoj se šumski proizvodi vertikalno uklanjaju iz šumskih sastojina i transportuju do mjesta za utovar pored puta (Chua, 2001). Ova metoda je uobičajena na sjeverozapadnom Pacifiku SAD-a i u zapadnoj Kanadi u proizvodnji drveta (Akay et al., 2008). U provinciji Britanska Kolumbija u Kanadi godišnje se helikopterskom sječom eksploatiše oko osam miliona m^3 drveta (Dunham, 2006). Helikopterska sječa se preferira za korišćenje drveta iz teško pristupačnih i strmih terena, kao i osjetljivih šumskih područja koja su nepristupačna zbog terena koji onemogućava transport putem kopna.

Generalno, metoda helikopterske sječe povećava produktivnost omogućavajući brzu proizvodnju velike količine trupaca. Osim toga, pruža bolje radne uslove u smislu zdravlja i sigurnosti radnika. Vizuelni uticaji od operacija sječe mogu se minimizirati primjenom helikopterske sječe (Akay et al., 2008).

S druge strane, menadžeri u šumarstvu treba da uzmu u obzir potencijalne nedostatke helikopterske sječe. Na primjer, helikopterska sječa zahtijeva visoke investicione i operativne troškove, potrebne su velike površine za sletanje i zahtijeva obučeno i iskusno osoblje . Helikopterska sječa, poznata i kao helilogging, koristi se od ranih 1970-ih kao metoda sječe sa smanjenim uticajem na okolinu. Iako je sječa helikopterima skuplja od drugih sistema sječe, upotreba ove alternativne metode se i dalje širi u šumarstvu (Akay i Bilici, 2016).

Helikopterska sječa omogućava pristup udaljenim područjima koja ne mogu biti dostupna putem kopnenog transporta. Studije i dosadašnja praksa su pokazale da helikopteri ne mogu raditi u teškim vremenskim uslovima (Bruce, 2003; Akay et al., 2008; Dunham, 2006). Kako bi se prevazišli nedostaci helikopterske sječe, operacije sječe treba dobro planirati, a opremu za sječu pažljivo odabrati kako bi se minimizirali troškovi i smanjio uticaj na okolinu. Postoje mnogi modeli helikoptera koji se koriste u sječi (Tabela 7.4)

Tabela 7.4. Specifikacije nekih helikoptera koji se koriste za transport drveta (Dunham, 2006)

Proizvođač/Model	Nosivost (t)	Snaga motora (kW)
Bell 204B	1.8	820
Bell 204A	2.3	1044
Bell 212	2.3	671
Bell 214B	3.6	2185
Boeing V-107 II	4.8	932
Boeing CH-234LR	12.7	3039
Sikorsky S-64E	9.1	3356
Sikorsky S-64F	11.3	3579
Eurocopter A-Star B2	1.2	732
Eurocopter SA-315B Lama	1.2	640
Kaman K-1200	2.7	1342
Kamov KA-32A	5.0	1645
Sikorsky S-58T	2.3	700
Sikorsky S-61N	3.6	1044
Sikorsky S-61N Shortski	4.1	1044





Slika 7.11. Helikopterska sječa (www.summitpost.org) Slika 7.12. Sikorsky S-64E

Prema istraživanju Bigsby i Linga (2013), produktivnost helikopterskog transporta drveta analizirana je kroz nekoliko ključnih faktora. Produktivnost se mjeri kao zapremina po satu (m^3/sat), a rezultati pokazuju da je prosječna produktivnost funkcija prosječne udaljenosti leta po ciklusu, prosječnog broja trupaca po ciklusu i tipa helikoptera. Produktivnost je negativno povezana sa prosječnom udaljenošću leta po ciklusu, dok je pozitivno povezana sa prosječnim brojem trupaca po ciklusu. Na osnovu regresione analize, utvrđeno je da helikopter Sikorsky S-61F ima nižu produktivnost u poređenju sa modelima S-64E i S-64F, zbog manjeg kapaciteta nosivosti (Slika 7.12). Optimalno planiranje, koje uključuje balansiranje veličine trupaca i upotrebu čokera, ključ je za održavanje visoke produktivnosti helikopterskog transporta drveta.

Iznošenje drveta helikopterom predstavlja specifičan i sofisticiran način transporta drveta, koji je često nužan u posebnim uslovima. Iako je ovaj način transporta značajno skuplji – čak osam puta skuplji od privlačenja drveta skiderima i četiri puta skuplji od iznošenja žičarama –

on ima svoje neosporne prednosti i karakteristike koje ga čine pogodnim za određene situacije.

Osnovne karakteristike iznošenja drveta helikopterom uključuju:

- Nezavisnost od terenskih uslova, što znači da helikopter može raditi u najtežim i nepristupačnim terenima.
- Pogodnost za rad na osjetljivim staništima, jer ne dolazi do sabijanja tla i erozije, čime se čuva prirodni ekosistem.
- Primjenjivost pri svim sistemima gazdovanja šumama, nezavisno od njihove otvorenosti.
- Učinkovit rad, koji omogućava brzu i efikasnu eksploataciju drveta.
- Ograničena nosivost, što zahtijeva precizno planiranje i optimalno iskorišćenje kapaciteta helikoptera.
- Potrebu za obučenom radnom snagom i dobro planiranje i sinhronizaciju svih učesnika u procesu, čime se smanjuje rizik od nesreća.
- Opasan rad, gdje je sigurnost svih učesnika od izuzetne važnosti.

Specifičnosti tehničke opreme uključuju korištenje nosivog užeta dužine 30-50 m, zavisno od visine sastojine, dok se vitlo ne koristi jer smanjuje nosivost helikoptera i usporava radni ciklus. Najznačajniji parametar produktivnosti helikoptera je iskorišćenje teoretske nosivosti, koja se kreće od 60 do 80%. Između kuke i nosivog užeta nalazi se dinamometar koji u slučaju preopterećenja automatski otpušta teret, što predstavlja izvor opasnosti u radu (Slika 7.13).

Produktivnost helikoptera zavisi od nekoliko faktora, uključujući horizontalnu i vertikalnu udaljenost, zapreminu tereta, vrstu sječe, pripremu tereta i iskustvo operatera. Helikopteri zahtevaju točenje goriva svakih 90 minuta, što traje oko 15 minuta, kao i redovnu zamjenu pilota.



Slika 7.13. Načini kačenja drveta (Akay i Bilici, 2016)

Troškovi uključuju nabavnu cijenu helikoptera od oko 2.5 mil. evra, što predstavlja značajnu investiciju. Vrijeme trajanja jedne ture je relativno kratko, od 2 do 3 minute, što omogućava

brzu smjenu ciklusa. Kapacitet transporta varira između 20 i 40 m^3 na sat, zavisno od specifičnih uslova rada i organizacije posla.

Troškovi rada helikoptera su visoki, kreću se od 1400 do 1700 eura po satu. Ovi troškovi uključuju održavanje helikoptera, gorivo, te rad pilota i podržavajućeg osoblja. Troškovi transporta drveta helikopterom iznose između 55 i 75 eura po m^3. Ova cijena obuhvata sve operativne troškove i doprinosi ukupnim visokim troškovima ove metode transporta.

Stovarišta i sletišta za helikopterski transport drveta moraju biti znatno veće površine nego kod privlačenja drveta skiderima, jer je potrebno prostor za odlaganje, sletanje i doradu drveta (Slika 7.14). U slučaju stablovne i deblovne metode izrade drveta, potrebno je angažovati dodatno ljudstvo i mašine. Posebni zahtjevi se odnose na skladištenje i čuvanje goriva, zbog čega je neophodna dodatna pažnja i sigurnosne mjere.



Slika 7.14. Stovarište kod helisječe (Akay i Bilici, 2016)

Iako su troškovi značajni, iznošenje drveta helikopterom ima svoje prednosti koje opravdavaju investiciju u specifičnim situacijama. Ova metoda omogućava efikasan transport u nepristupačnim terenima i osjetljivim staništima, gdje druge metode ne mogu biti primijenjene.

7.3.2. Transport zepelinima

Transport drveta zepelinima, ili lebdjelicama, predstavlja inovativan pristup koji se može koristi za prevoz drveta na teško pristupačnim ili ekološki osjetljivim područjima. Zepelini su letjelice s mekim ili tvrdim kućištem ispunjeni lakim gasom, najčešće helijumom ili vodonikom, koji omogućava uzgon i let. Zepelini mogu sletjeti i poletjeti vertikalno, što im omogućava da se koriste u područjima bez puteva ili pristupnih tačaka.

Prije nesreće Hindenburga u Lakehurstu, New Jersey, 1937. godine, zepelini su decenijama uspješno prevozili teret i putnike između mnogih gradova Evrope. Godine 1928. zepelin „Graf Zeppelin“ napravio je prvi prekookeanski let prevozeći 12 t tereta i 60 putnika i članova

posade, a kasnije, 1929. godine, obišao je svijet za 21 dan, zaustavljajući se samo tri puta. Ukupno, „Graf Zeppelin“ je obavio 650 letova, prešao oko milion milja i prevezao više od 18 hiljada putnika. Tokom perioda od 40 godina, Njemačka je izgradila 118 dirižabla koji su letjeli bez nesreća izazvanih požarom sve do nesreće Hindenburga. Njemačka je koristila zapaljivi vodonik umjesto nezapaljivog helijuma. Dana 6. maja 1937. godine, zepelin je zahvatio požar prilikom slijetanja u Lakehurst, usmrtivši 36 od 97 ljudi na brodu. Tragediju su zabilježili mediji dok se događala i ona je odjeknula širom svijeta. Zbog percepcije javnosti da su zepelini opasni, oni su nestali kao ozbiljna komercijalna opcija, posebno u svjetlu razvoja aviona tokom i nakon Drugog svjetskog rata.

Zepelini su kompleksni uređaji koji zahtijevaju specijalizovanu opremu i obučeno osoblje za rukovanje. Pored toga, vremenski uslovi mogu značajno uticati na upotrebljivost zepelina, jer jak vetar i loši vremenski uslovi mogu ograničiti njihovu upotrebu.

Zepelin je, u suštini, pogonjeni balon napunjen gasom, a uzgon se postiže lakšim gasom unutar balona i dinamičkim pogonom zbog kretanja kroz zrak. Obično omotač zepelina traje do 10 godina, uz povremeno dopunjavanje u slučaju curenja. Većina velikih modernih zepelina dijeli omotač na tri glavne komponente – dvije su ispunjene vazduhom (tzv. "baloneti"), dok je treća, velika komora, ispunjena helijumom (dobijenim iz prirodnog gasa). Helijum je vrlo lagan, inertan i nezapaljiv gas. Helijum je mnogo sigurniji od vodonika, ali ima 8% manju nosivost i košta oko osam puta više od vodonika. Neki zepelini koriste metalni "skelet" ili okvir unutar omotača kako bi dali oblik letjelici; ovi zepelini se nazivaju krutim zepelinima. Zepelini bez krutog okvira (ili "blimpovi") nemaju okvir unutra, već zadržavaju svoj oblik zahvaljujući dizajnu omotača i pritisku gasa. Ovo omogućava veliku fleksibilnost omotača, koji lakše apsorbuje naprezanja – savijanja i uvijanja, tokom leta i slijetanja u svim vremenskim uslovina. Polukruti zepelini su slični zepelinima bez krutog okvira, ali imaju "kobilicu" duž dna omotača kako bi ravnomjernije raspodijelili opterećenje kabine (ili gondole) kroz omotač. Zahvaljujući snažnim, laganim materijalima za omotače i gondole razvijenim od 1970-ih, gotovo svi današnji zepelini su bez krutog okvira (Feldman, 2003).

Neki od proizvođača zepelina su:

- Airship Management Services, Inc. (SAD): Kompanija koja se bavi prodajom i radom zepelina za različite aplikacije, uključujući komercijalno oglašavanje, vojne i vladine ugovore, te istraživačke projekte za privatne institucije.
- CargoLifter AG (Njemačka): Osnovana 1996. godine, ova kompanija dizajnira nove generacije zepelina za prevoz tereta širom svijeta, uključujući veliki zepelin CL160 koji je sposoban nositi 160 tona tereta.
- Lockheed Martin (SAD): Kompanija koja je uključena u testiranje i razvoj komunikacione opreme za zepeline i koristi zepeline za različite vladine i komercijalne aplikacije.



Slika 7.15. Skica transporta drveta zepelinom (https://foresthistory.org/)

7.4. Transport vodom

Transport drveta vodom predstavlja jedan od najstarijih i najefikasnijih načina prevoza drvne građe, posebno u područjima bogatim vodenim tokovima. Ova metoda transporta ima dugu istoriju i koristi se vijekovima zbog svojih mnogobrojnih prednosti, ali i specifičnih izazova.

Transport drveta vodom može se podijeliti na dvije osnovne faze. Prva faza podrazumijeva prikupljanje i skladištenje drveta na pomoćnim stovarištima smještenim na obalama vodotoka. Ova faza je ključna jer omogućava smanjenje udaljenosti privlačenja drveta iz ritskih šuma, gde izgradnja šumskih puteva nije isplativa zbog sezonskih poplava. Druga faza uključuje sam transport drveta vodenim putem do odredišta.

Plavarenje i splavarenje su dvije osnovne metode transporta drveta vodom. Plavarenje podrazumijeva slobodno plutanje pojedinačnih trupaca niz vodotok, dok splavarenje uključuje povezivanje trupaca u splavove koji se potom vuku nizvodno. Oba načina imaju svoje prednosti i nedostatke. Plavarenje je jednostavnije i jeftinije, ali može dovesti do većih gubitaka usljed razdvajanja trupaca i otežanog upravljanja tokom transporta. Splavarenje, s druge strane, omogućava bolju kontrolu i sigurnost tereta, ali zahtjeva više vremena i resursa za pripremu i upravljanje splavovima. Korišćenje brodova za prevoz tereta i unutrašnju plovidbu putem kanala i rijeka je takođe vid transporta, naravno ako za to postoje uslovi

Prednosti transporta drveta vodom uključuju ekonomsku isplativost, naročito u teško pristupačnim područjima, i manji uticaj na životnu sredinu u poređenju sa kopnenim transportom. Ova metoda takođe omogućava prevoz velikih količina drveta odjednom, smanjujući potrebu za čestim ciklusima. Međutim, transport vodom zavisi od prirodnih uslova kao što su nivo vode i sezonske varijacije, što može predstavljati značajan izazov.

Razlozi korišćenja ove specifične vrste daljinskog transporta drveta su višestruki. Pored smanjenja udaljenosti privlačenja drva iz ritskih šuma, transport vodom je često jedina mogućnost prevoza drveta sa ada, malih rečnih ostrva, gde su kopneni putevi nepristupačni ili neisplativi.

Pri transportu drveta vodom često se koristi vučni sistem, koji se sastoji od skupa pojedinačnih plovnih objekata spojenih vučnom užadi. Ovaj sistem obuhvata nekoliko komponenti: tegljač "remorker" kao pogonsko vučno plovilo, teglenicu "šlep" koja je transportno plovilo bez sopstvenog pogona, i dizalice koje su plovila opremljena utovarnom rampom. Uobičajeno se koriste dva tipa teglenica nosivosti 300 m^3 i 600 m^3, zavisno od nivoa vodostaja i mogućnosti ulaska u riječne rukavce.

Karakteristike transporta vodom:

- Ekonomska isplativost: Transport vodom je obično jeftiniji od kopnenog transporta, posebno za velike količine tereta,
- Ekološka prihvatljivost: Ima manji uticaj na životnu sredinu u poređenju sa kamionskim ili željezničkim transportom,
- Kapacitet: Omogućava prevoz velikih količina drveta odjednom, što smanjuje potrebu za čestim transportima,
- Ograničenja: Zavisi od prirodnih vodnih puteva ili razvijenih kanala, što može biti ograničavajući faktor u nekim regionima.

Primjenjivost:

Transport drveta vodenim putem je primjenjiv u područjima gdje postoje pogodni vodni putevi, kao što su rijeke i kanali. Idealno je za regiona sa razvijenom mrežom unutrašnjih vodnih puteva i blizinom industrijskih centara uz obale.

Troškovi:

- Operativni troškovi: Generalno su niži u poređenju sa kopnenim transportom. Troškovi splavarenja su minimalni, dok troškovi brodskog transporta uključuju gorivo, posadu i održavanje plovila.
- Infrastrukturni troškovi: Potrebna je investicija u razvoj i održavanje kanala, luka i drugih infrastrukturnih objekata.

Izazovi:

- Sezonske varijacije: Nivo vode u rijekama može varirati tokom godine, što može otežati transport u sušnim periodima,
- Pristupačnost: Udaljeni ili planinski regioni mogu imati ograničen pristup vodnim putevima,
- Sigurnost tereta: Postoji rizik od gubitka ili oštećenja drveta usljed nevremena ili nesreća na vodi.

Model riječnog kanala za transport drveta omogućava najefikasniju isporuku drveta potrošačima, minimizirajući materijalne gubitke i negativne uticaje na životnu sredinu. Posebno je koristan za rijeke sa kratkom sezonom plovidbe, jer se isporuka mora obaviti u ograničenom vremenskom periodu tokom kojeg nivoi vode variraju, uslovi za plovidbu su

rijetko povoljni, a informacije o dimenzijama transporta nisu dostupne. Informacije iz pilot karata, kada se nivoi razlikuju od projektovanih, trebaju biti provjerene, što može oduzeti dosta vremena. Ipak, uz pomoć ovih karata i uz relativno niske troškove, moguće je dizajnirati model. Na osnovu veličine kanala i radijusa zakrivljenosti plovnog puta, izračunavaju se dozvoljene veličine splavova (Posypanov et al., 2019).





Slika 7.16. Transport drveta vodom (https://ich.unesco.org/) Slika 7.17. Transport brodovima (https://gcaptain.com)

Literatura:

Akay, A. E., & Bilici, E. (2016). Helicopter logging method for reduced impact timber harvesting operations. European Journal of Forest Engineering, 2(1), 48-53.

Akay, A. E., Acar, H. H., & Sessions, J. (2008). An analysis of utilizing helicopter logging in Turkish forestry. Journal of Applied Sciences, 8(21), 3910-3916.

Arce, J. E., Carnieri, C., Sanquetta, C. R., & Filho, A. F. (2002). A forest-level bucking optimization system that considers customer's demand and transportation costs. Forest Science, 48(3), 492-503.

Bigsby, H. R., & Ling, L. (2013). Productivity of heli-logging with the Sikorsky S-61F, S-64E and S-64F in Sarawak. 2013 Conference, August 28-30, 2013, Christchurch, New Zealand 160195, New Zealand Agricultural and Resource Economics Society.

Bruce, B. (2003). Helicopter Logging's Bumpy Ride. Using helicopters to thin forests instead of fighting fires. Journal of Logging & Sawmills. Timber West.

Carlsson, D. & Rönnqvist, M. 1998. Tactical planning of forestry transportation with respect to backhauling. LiTH-Mat-R-1998-13. Linköping University, Sweden

Chesneau, J. B., Le Net, E., & Berg, S. (2012). A transport tool to evaluate sustainability impacts of transport processes within the Forest Wood Chain. European Journal of Forest Research, 131, 73-80.

Chua, D. (2001). Helicopter harvesting in the hill mixed dipterocarp forests of Sarawak. Applying Reduced Impact Logging to Advance Sustainable Forest Management. In International Conference Proceedings (Vol. 26).

Dunham, M. (2006). An overview of helicopter logging in British Columbia. In Proceedings of the 29 the Council on forest Engineering Conference, Coeur d'Alene, Idaho, July (pp. 77-83).

Feldman, O (2003). The Possible Use of Airships in the Scottish Forest Industries. Transport Research Institute, Napier University, Edinburgh 1-15

Forsberg, M. 2003. Inter-enterprise collaboration for cost-effective roundwood haulage. Skogforsk Resultat 12. SkogForsk, Sweden. (In Swedish, English summary)

Ghaffariyan, M. R., Barrier, C., Brown, M., Kuehmaier, M., & Acuna, M. (2018). A short review of timber truck fuel consumption studies. Australian Forests Operations Research Alliance (AFORA) Industry Bulletin, 21.

Gronalt, M., & Rauch, P. (2018). Analyzing railroad terminal performance in the timber industry supply chain–a simulation study. International Journal of Forest Engineering, 29(3), 162-170.

Gunnarsson, H., Rönnqvist, M., & Lundgren, J. T. (2004). Supply chain modelling of forest fuel. European journal of Operational research, 158(1), 103-123.

Kjell, M., Westerlund, K.R., 2009: Feasibility of Longer Combination Vehicles A pre-study of Longer Combination Vehicles in hub-to-hub long haulage of mixed goods. Master of Science Thesis, Department of Technology Management and Economics, Division of Logistics and Transportation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, str. 1–90.

Kons, K., Bergström, D., Eriksson, U., Athanassiadis, D., & Nordfjell, T. (2014). Characteristics of Swedish forest biomass terminals for energy. International Journal of Forest Engineering, 25(3), 238-246.

Korpilahti, A. 1989. A system for analysing truck haulage of timber. Metsäteho Review 12/1989. Metsäteho, Helsinki, Finland. (In Finnish, English summary).

Löfroth, C., Larsson, L., Enström, J., Cider, L., Svenson, G., Aurell, J., ... & Asp, T. (2012). ETT-a modular system for forest transport. In HVTT12: 12th international symposium on heavy vehicle transport technology.

McCormack, R. J. (1990). TRUCKSIM-a log truck performance simulator. Journal of Forest Engineering, 2(1), 31-37.

Mokhirev, A., Gerasimova, M., & Pozdnyakova, M. (2019). Finding the optimal route of wood transportation. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 226, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.

Nikolić, S. (1990): Mehanizacija u šumarstvu, Šumarski fakultet Beograd. 201 p

Nurminen, T., & Heinonen, J. (2007). Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. Silva Fennica, 41(3), 471-487.

Palander, T., & Väätäinen, J. (2005). Impacts of interenterprise collaboration and backhauling on wood procurement in Finland. Scandinavian journal of forest research, 20(2), 177-183.

Pandur, Z., Nevečerel, H., Šušnjar, M., Bačić, M., & Lepoglavec, K. (2022). Energy efficiency of timber transport by trucks on hilly and mountainous forest roads. Forestist, 72(1), 20-28.

Posypanov, S. V., Kozlov, V. G., Skrypnikov, A. V., Nikitin, A. A., & Tikhomirov, P. V. (2019). Model of river channel for timber transportation. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1333, No. 3, p. 032042). IOP Publishing.

Ranta, T., Korpinen, O. J., Eero, J., & Karttunen, K. (2012). Forest biomass availability analysis and large-scale supply options. Open Journal of Forestry, 2(01), 33.

Rauch, P., & Gronalt, M. (2010). The terminal location problem in the forest fuels supply network. International Journal of Forest Engineering, 21(2), 32-40.

Šušnjar, M., Horvat, D., Pandur, Z., & Zorić, M. (2011). Određivanje osovinskih opterećenja kamionskoga i tegljačkoga skupa za prijevoz drva. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 32(1), 379-387.

Tomašić, Ž., Sučić, Ž., Slunjski, M., & Polaček, M. (2005). Ovodobno stanje prijevoza drva kamionskim skupovima u hrvatskom šumarstvu. Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, 26(1), 65-71.

Väätäinen, K., Anttila, P., Eliasson, L., Enström, J., Laitila, J., Prinz, R., & Routa, J. (2021). Roundwood and biomass logistics in Finland and Sweden. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 42(1), 39-61.

Väkevä, J. 1999. Long-distance transportation in 1990-98. TTS-Institute Forestry Bulletin 10/1999. TTS Institute, Helsinki, Finland. (In Finnish, English summary).

Wolfsmayr, U. J., Merenda, R., Rauch, P., Longo, F., & Gronalt, M. (2016). Evaluating primary forest fuel rail terminals with discrete event simulation: A case study from Austria. Annals of Forest Research, 59(1), 145-164.

Zorić, M. (2012). Inovacije u kamionskom prijevozu drva–» One stack more «. Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, 33(1), 69-78.

8. MAŠINE ZA PODIZANJE, NJEGU I ZAŠTITU ŠUMA

8.1. Mašine za sakupljanje i obradu šumskog sjemena

Sjeme šumskog drveća se bere iz krošnje dubećih stabala, sa oborenih stabala i sa površine zemljišta. Mašine za sakupljanje i obradu šumskog sjemena su specijalizovani uređaji konstruisani za prikupljanje, ekstrakciju, čišćenje i pripremu sjemena drveća i drugih šumskih biljaka. Ove mašine imaju važnu ulogu u procesu obnove šuma, jer omogućavaju sakupljanje visokokvalitetnog sjemena koje se koristi za pošumljavanje ili za očuvanje i reprodukciju šumskih ekosistema.

8.1.1. Penjalice

Sakupljanje šumskog sjemena je neophodna aktivnost za očuvanje i obnovu šumskih ekosistema. Penjalice za drvo su ključni alati u ovom procesu, omogućavajući sakupljačima da pristupe visokim granama stabala radi berbe zrelog sjemena (Stubsgaard, 1997). Penjalice se uzrađuju od visokokvalitetnog trakastog čelika i pričvršćuju se za noge berača kaiševima. Opremljene su šiljcima, koje berač ubada u deblo kada se penje, čime dobija oslonce za noge. Dolaze u različitim veličinama i oblicima, prilagođenim različitim vrstama drveća i terena. Neki modeli imaju podesive kuke ili stege koje se mogu prilagoditi debljini i teksturi drveta, što ih čini veoma praktičnim za različite uslove (Donahue i Wood, 1995).

Tipičan dizajn penjalica obuhvata okvir, ploče za stopala, kuke ili stege, sigurnosne pojaseve i sisteme, kao i prilagodljive elemente. Ove komponente su ključne za stabilno pričvršćivanje penjalica na drvo, osiguravajući korisniku sigurno penjanje i rad. Moderne penjalice su dizajnirane tako da se vertikalni metalni okvir, obično opremljen plastičnim poklopcem za fiksiranje koji se nanosi na potkoljenicu stopala, postavlja na unutrašnju stranu stopala radnika. Šiljci su pričvršćenji za vertikalni okvir ili kao fiksni ili kao zamenljivi. Zamjenljivi šiljci različitih veličina se biraju i montiraju na penjalice u zavisnosti od vrste drveta.

Baumvelo penjalice ne rade na principu zabijanja šiljaka u drvo, već su zasnovane na fizičkom principu dvokrake poluge. Svaka od dvije penjalice, pričvršćene za noge berača, opremljena je fleksibilnim čeličnim obručem podesivim po dužini umetnutim u kraj poluge sa osloncem. Na početku rada, obruč je labavo omotan oko debla drveta i pričvršćen. Kada se penje berač pomijera penjalice gore ili dole po deblu. Ako berač smanji opterećenje i podigne stopalo, oslobađa se pritisak izazvan prenošenjem jednog dijela težine berača preko okvira penjalice na oslonac za noge i na suprotnu tačku oslonca obruča. Čim berač stavi težinu na penjalicu, dio njegove težine se svojim okvirom se prenosi na oslonac za noge i suprotnu tačku obruča. Upotreba Baumvelo sprave za penjanje je veoma bezbjedno u poređenju sa penjalicama sa šiljcima, jer što više berač opterećuje penjalicu, to više sile penjalica primjenjuje na deblo (Slika 8.1). Korišćeni princip je takođe veoma prihvatljiv za deblo. Ravno izraslo deblo bez grana i kvrga je neophodan preduslov za korišćenje ove vrste penjalice.





Slika 8.1. Baumvelo penjalica (https://www.wilde.sk) Slika 8.2. Treehog set za penjanje (https://treehog.co.uk)

Tehnike i oprema, poput užadi i sigurnosnih sistema, uglavnom se preuzimaju iz planinarenja i prilagođene za upotrebu u šumarstvu, pri čemu se naglašava koncept "sigurnosnog lanca", gdje svaki element mora biti pažljivo odabran kako bi se spriječile opasnosti od pada (Longo et al., 2013).

Užad za penjanje po drveću obično se prave od sintetičkih materijala ili kombinacija sintetičkih i prirodnih vlakana. Ti materijali uključuju najlon (poliamid), polipropilen, poliesterska vlakna ili njihove kombinacije. Nekoliko materijala koji se često koriste su:

- Najlon (poliamid): Često se koristi zbog svoje izdržljivosti, fleksibilnosti i otpornosti na habanje. Najlon užad su lagana i otporna na vlagu.
- Polipropilen: Ovaj materijal takođe ima visoku otpornost na habanje i vlagu, ali može biti malo manje fleksibilan od najlona. Ipak, polipropilenske užadi su obično jeftinije.
- Poliesterska užad: Poliesterska vlakna su izdržljiva i imaju dobru otpornost na UV zračenje i vlagu. Ova užad su takođe čvrsta i pouzdana.
- Kombinacija materijala: Neke užadi se prave od kombinacija različitih sintetičkih materijala radi poboljšanja performansi, kao što su jačina, fleksibilnost i otpornost.

Užad za penjanje se mogu podijeliti prema strukturi na tri osnovne vrste: upredene (pletene), pletene i dinamičke (elastične) užadi. Upredena (pletena) užad se sastoje od mnogo tankih vlakana uvijenih zajedno u snopove, koji se zatim uvijaju zajedno u uže. Ova struktura daje užetu izdržljivost i čvrstoću, čineći ih pogodnima za penjanje po drveću, i slične aktivnosti. Pletena užad se izrađuju pletenjem vlakana u složene obrasce. Pletena užad su često fleksibilnija od upredenih, ali mogu biti manje čvrsta. Međutim, ova struktura može pružiti bolje rukovanje i udobnost penjaču. Dinamička (elastična) užad su dizajnirana da apsorbuju udarce i pruže elastičnost tokom penjanja. To ih čini idealnim za aktivnosti kao što su penjanje po drveću. Dinamička užad su često upredena ili pletena, ali imaju posebnu strukturu koja im omogućava elastičnost. Za rad na visinama koriste se nisko rastezljiva užad sa obloženim jezgrom i minimalnom nosivošću od 22 kN.

Postoje i druge mogućnosti za penjanje na drveće kao što su:, ručna i mehanizovana vitla, dizalice, hidraulične podizne platforme postavljene na šasiju kamiona ili na traktoru, merdevine, balon i helikopter.

8.1.2. Tree shaker

Tree shaker je specijalizovana mašina koja se koristi za prikupljanje plodova i sjemena sa drveća (Afsah-Hejri et al., 2022). Ova mašina koristi mehaničku vibraciju ili slične tehnike kako bi olakšala otpuštanje plodova ili sjemena sa grana. Tree shaker koristi vibraciju kako bi uzdrmao drvo i otpustio plodove ili sjeme. Ova tehnika omogućava brzo i efikasno prikupljanje, smanjujući potrebu za ručnim radom. Napredniji modeli tree shakera omogućavaju podešavanje intenziteta vibracija kako bi se prilagodili različitim vrstama drveća i uslovima berbe. Obično su dizajnirani sa posebnim pričvršćenjima ili rukohvatima koji omogućavaju efikasno i sigurno korišćenje na različitim vrstama drveća. Nakon što plodovi ili sjeme budu otpušteni, tree shakeri često imaju ugrađene sisteme za sakupljanje koji olakšavaju prikupljanje i transport do dalje obrade. Potrebno je da se utvrde optimalne frekvencije vibracija pri kojim sjeme najlakše otpada (Zhou et al., 2012). Danas najkorišteniji sistemi, zbog svoje jednostavnosti, su orbitalni tree shaker-i, koji koriste ekscentričnu masu koja se rotira velikom brzinom unutar stezaljke sposobne da uhvati debla stabala i primjeni vibraciju (Sanchez-Cachinero et al., 2022). Ove mašine su se značajno razvile tokom zadnjih nekoliko decenija, sa glavnim ciljem maksimiziranja uklanjanja plodova uz minimiziranje oštećenja stabla. Procjenjuje se da je za održivost berbe potrebno postići barem 85% efikasnosti u uklanjanju plodova (Farinelli et al., 2008) .

Tree shakeri mogu biti dizajnirani sa točkovima ili drugim mobilnim sistemima koji omogućavaju jednostavno manevrisanje i kretanje (Slike 8.3 i 8.4). Neki se montiraju kao priključni uređaji na traktor ili neki drugu mašinu, a neki su samostalni samohodni uređaji. Neki od poznatih proizvođača tree shakera su: Orchard Machinery Corporation, AMB Rousset, Oxbo International Corporation, Littau Harvester, BEI International LLC, OliNet i dr. STIHL koji je poznat po svojim motornim testerama takođe proizvodi tree shakere za berbu voća i orašastih plodova.





Slika 8.3. Tree shaker kao priključak (www.amb-rousset.com) Slika 8.4. Tree shaker kao vozilo (www.shakermaker.com)

8.1.3. Uređaji za ekstrakciju sjemena iz šišarki

Mašine za ekstrakciju sjemena iz šišarki su specijalizovani uređaji koji se koriste za efikasno i precizno izdvajanje sjemena iz šišarki, čime se olakšava proces sakupljanja i pripreme sjemena

za dalju upotrebu. Ovi uređaji mogu biti od velike pomoći u uzgoju drveća, naročito u šumarstvu i rasadničarstvu (Schmidt, 2007). Postoji nekoliko tipova mašina koje se koriste za ovu svrhu koje rade na različite načine.

Ručne mašine za ekstrakciju sjemena su obično manje i pogodne za manje količine. One obično koriste mehaničku ili ručnu snagu kako bi izdvojile sjeme iz šišarki. Ručne mašine su pogodne za manje plantaže ili uzgoj u malom obimu. Automatske mašine za ekstrakciju sjemena su veće i obično se koriste u komercijalnim ili industrijskim pogonima. One mogu imati različite tehnologije za ekstrakciju sjemena, uključujući vibracione ili rotacione sisteme koji pomažu u efikasnom izdvajanju sjemena iz šišarki. Pneumatske mašine za ekstrakciju sjemena koriste vazduh pod pritiskom kako bi izdvojili sjeme iz šišarki. Pneumatske mašine su često veoma efikasne i mogu se koristiti za velike količine sjemena. Mašine sa sitima ili separatorima koriste sita ili druge sisteme filtriranja kako bi odvojile sjeme od ostalih dijelova šišarki ili materijala koji se ne koristi.

Ekstrakcija sjemena iz šišarki uz zagrijavanje može se obaviti korištenjem odgovarajuće opreme. Ovaj proces se često koristi u pripremi sjemena i šumarstvu kako bi se ubrzalo i olakšalo izdvajanje sjemena iz šišarki.

Rotacione peći se koriste za zagrijavanje šišarki na odgovarajućoj temperaturi kako bi se omogućilo lako otpuštanje sjemena. Ove peći obično imaju kontrolisane temperature i rotirajuće elemente kako bi se osiguralo ravnomjerno zagrijavanje šišarki. Sušare za šišarke se takođe mogu koristiti za ekstrakciju sjemena uz zagrijavanje. Šišarke se postavljaju u sušaru gdje se zagrijavaju na odgovarajuću temperaturu kako bi se otpustile sjeme. Ove sušare obično imaju kontrolisane temperature i ventilacione sisteme za efikasno sušenje i izdvajanje sjemena. Vibracione mašine se mogu koristiti zajedno sa zagrijavanjem kako bi se dodatno olakšalo otpuštanje sjemena.

Postoje i specijalizovane mašine koje kombinuju tretiranje sjemena sa zagrijavanjem kako bi se postigla optimalna efikasnost ekstrakcije. Ove mašine obično imaju više koraka procesa uključujući i zagrijavanje i mehaničko tretiranje sjemena (Slika 8.5).



Slika 8.5. Ekstraktor sjemena Wet Dewinger & Seed Extractor 800 (www.bccab.com)

8.2. Mašine u šumskim rasadnicima

Mašine koje se koriste u šumskim rasadnicima imaju važnu ulogu u upravljanju procesima uzgoja sadnica i pripreme zemljišta. Ove mašine uključuju uređaje za uklanjanje stabala i pripremu zemljišta, sjetvu i presađivanje. Moderni rasadnici koriste automatizovane sisteme za preciznu sjetvu i njegu biljaka, što omogućava optimizaciju proizvodnje velikih količina sadnica uz smanjenje radne snage i troškova. Pored toga, mašine za zaštitu bilja i specijalizovana oprema za vađenje i transport sadnica omogućavaju bržu i efikasniju distribuciju gotovih sadnica na terenu, što doprinosi očuvanju šumskih resursa i unapređenju šumarske proizvodnje.

8.2.1. Uklanjanje stabala

Priprema šumskog zemljišta za podizanje rasadnika ključan je korak u procesu proizvodnje šumskih sadnica. Jedan od prvih koraka je čišćenje terena. Obično se započinje rekognosciranjem lokacije, određivanjem mjesta za stovarišta i rasporeda trasa koji će služiti realizaciji sječe. Obično se sastojina uklanja na dva načina. Prvi način je uklanjanje dubećih stabala obaranjem jednostavnim povlačenjem vitlom pri čemu se vrši obaranje stabla i čupanje korijena ili guranje stabla odrivnom daskom buldozera, utovarivača ili nekom drugom jakom mašinom. Drugi način je klasična sječa motornom testerom sa naknadnim uklanjanjem panjeva.

Vađenje panjeva može se izvoditi na različite načine, pri čemu je mehanizovano uklanjanje najčešći metod (da Silva Correia et al., 2020). Uklanjanje panjeva korišćenjem nazubljenih oštrica za krčenje ima dvije varijante. Prema mjestu montiranja alata se dijele na uređaje gdje su uske oštrice specijalnog oblika naprijed ili riperi pozadi na dozeru. Pored toga, postoje i izvlakači za panjeve koji se guraju ispod panja koji se potom iščupaju kombinacijom vertikalnih i horizontalnih sila (Slike 8.6 i 8.7).





Slika 8.6. John Deer Stump Bucket SRBTUN (www.cce.attachments.emmetts.com.au) Slika 8.7. Caterpillar dozer s riperom (www.cat.com)

Bušenje ili usitnjavanje panjeva vrši po principu traktorske šuplje bušilice prečnika do 600 mm, koja buši cilindar zemlje uključujući i panj. Usitnjavanje panjeva vrši se specijalnom

traktorskom glodalicom sa horizontalnim ili vertikalnim smjerom rotacije. Freze na traktoru se koriste samo za uklanjanje nadzemne mase panjeva (Slike 8.8 i 8.9).





Slika 8.8. Uređaj za bušenje panjeva (www.ellettariluca.com) Slika 8.9. BANDIT 2650 grinder (www.banditchippers.com)

Krčenje panjeva uz upotrebu adaptera na hvataljakma bagera se koristi za panjeve velikih dimenzija. Jednostavnija opcija je upotreba zuba za cijepanje montiranog na hidrauličnom ruci, kojim se samo iščupa panj. Kompleksnija opcija je upotreba specijalnog alata koji služi ne samo za kidanje panjeva, već i za odsjecanje korijena i cijepanje velikog panja prije nego što se iščupa i eventualno djelimično otresanje zemlje sa panja pomoću vibracija alata. Produktivnost ovih mašina (KH-120, Kockums-Herkules, Pallari Stump Harvester) su do 90 panjeva (prečnik 35 cm) na sat.



Slika 8.10. Pallari KHM-140 stump harvester (www.tervolankonepaja.fi)

8.2.2. Priprema zemljišta

Mehanička priprema poboljšava fizička i hemijska svojstva zemljišta u šumskim rasadnicima, suzbija korov, povećava vodosnabdijevanje zemljišta, poboljšava strukturu zemljišta i samim tim povoljno utiče na klijanje sjemena kao i na razvoj rasada. Postoje dvije faze pripreme zemljišta: gruba (osnovna) priprema i fina priprema. Gruba priprema zemljišta obuhvata oranje s tri osnovna dejstva: okretanje gornjeg sloja zemljišta, miješanje i drobljenje. Plugovi su alati ili mašine koje se koriste za obradu zemljišta, odnosno za oranje. Generalno plugovi su obično priključak na traktor ili neko drugo radno vozilo. Prema konstrukciji alata za oranje, plugovi se dijele na plugove s daskom, plugove s diskovima i rotacione plugove.

Plug s daskom je tradicionalni alat koji se koristi za primarnu obradu zemljišta. Namijenjen je prevrtanju zemlje, zatrpavanju ostataka usjeva i prebacivanju svježe zemlje na površinu. Plug se sastoji od nekoliko dijelova, uključujući zakrivljenu oštricu poznatu kao obod, koja je odgovorna za okretanje zemlje, i noža koji se zove ralo, koji siječe u zemlju ispred oboda. Iako je u mnogim poljoprivrednim operacijama uglavnom zamijenjen modernijom opremom, plug s daskom i dalje ima svoje mjesto u rasadničarstvu, posebno tamo gde je potrebna duboka obrada zemljišta ili u praksama gdje je prioritet očuvanje strukture zemljišta.

Plugovi s diskovima se koriste se za oranje zemlje i pripremu za sadnju. Diskovi su montirani na plug i koriste se za razbijanje i okretanje zemlje. Glavni cilj plugova s diskovima je duboko obrađivanje tla i priprema za sjetvu. Plug s diskovima treba razlikovati od tanjirača koje se koriste za obradu površinskog sloja zemljišta nakon što je zemlja već uzorana. Tanjirače imaju ravne ili zakrivljene diskove koji se okreću dok se vuče po površini tla. Njihova svrha je ravnanje površine, razbijanje grumenja, uništavanje ostataka usjeva i stvaranje optimalnih uslova za klijanje sjemena. Tanjirače se koriste nakon oranja kako bi se postigla ravna površina i poboljšala struktura gornjeg sloja.

Rotacioni plugovi se razlikuju od klasičnih plugova po tome što umjesto tradicionalnih daski i raonika koriste rotirajuće oštrice ili noževe kako bi obrađivali zemljište. Rotirajuće oštrice su montirane na horizontalnom vratilu ili osovini. Oštrice su obično izrađene od čvrstog metala i raspoređene su duž vratila u redovima. Ove oštrice se okreću brzo dok se plug vuče po podlozi. Rotacioni plugovi imaju čvrsti okvir koji drži vratilo i oštrice. Okvir može biti dizajniran da se može prilagoditi različitim širinama i dubinama brazde. Rotacioni plugovi se često koriste u pripremi tla za sadnju, kao i u konzervacijskoj poljoprivredi gdje se nastoji minimizirati erozija zemljišta. Takođe su efikasni za brzu obradu većih površina zemlje i sve više se koriste u svijetu. Najveća prednost rotacionih plugova je to da nema razora i slogova po parceli, tj. zemljište ostaje idealno ravno. U principu su slični rotacionim frezama, ali razlikuju se od njih po nižoj brzini, do 120 obrtaja u minuti i većoj dubini moguće obrade zemljišta (do 40 cm). Prednost rotacionih plugova je kvalitet dobijenog tretmana zemljišta, koji je sličan klasičnim višeoperativnim postupcima.



a) b) c)

Slika 11. Plug – a) s daskom, b) s diskovima c) rotacioni

Rotacioni kultivatori sa bubnjevima, poznati i kao rotacione freze se sastoje od rotirajućeg bubnja ili niza kandži koje razbijaju i provjetravaju zemlju, pripremajući je za sadnju. Ovi

uređaji se često koriste u baštovanstvu, pejzažnom uređenju, rasadnicima i poljoprivredi. Rotiranje bubnja ili kandži omogućava efikasno miješanje zemlje, razbijanje sabijenog zemljišta i miješanje humusa sa zemljom. To pomaže u poboljšanju strukture zemlje, zadržavanju vlage i raspodjeli hranljivih materija. Noževi istovremeno vrše dva pokreta pri obradi zemljišta, pravolinijsko kretanje u pravcu kretanja mašine i rotaciono kretanje bubnja s noževima pri čemu se istovremeno mrvi i baca zemlja na podlogu, gdje dolazi i do sekundarnog mrvljenja zbog udara. Pogon rotacionog kultivatora se izvodi iz priključnog vratila traktora, a vuča se fiksira u tri tačke. Spojnice obrtnog momenta služe protiv oštećenja noževa pri udaru u prepreku. Rotacioni kultivator istovremeno obavlja nekoliko operacija kao što su usitnjavanje zemlje, unošenje komposta u zemlju i ravnjanje površine zemljišta. Dubina zahvata je od 5 do 25 cm. Mašina se ne može koristiti na kamenitim zemljištima.

Dolaze u različitim veličinama i konfiguracijama kako bi odgovarali različitim tipovima zemljišta i namjenama. Mogu se montirati na traktore ili koristiti kao samostalne jedinice, a neki modeli nude podešavanja dubine i širine kako bi se prilagodili različitim praksama i vrstama usjeva.



Slika 8.12. Rotacioni cultivator (www.hightor.com) https://www.rath-maschinen.com/en/mastertrac.html

8.2.3. Sjetva

Mašine za sjetvu (sijalice) u rasadnicima su specijalizovane mašine dizajnirane za automatsko sijanje sjemena u rasadničke posude ili leje. Njihova uloga je ubrzati i olakšati proces sadnje sjemena. Omogućuju automatizaciju procesa sjetve, što rezultira uštedom vremena i radne snage. Ove mašine su dizajnirane za preciznu sjetvu, što osigurava konzistentnost u rasporedu sjemena. To je posebno važno u rasadničkim uslovima gdje je potrebna jednaka količina sjemena po posudi ili leji zbog optimalnog rasta biljaka. Precizna sjetva pomaže u smanjenju gubitaka sjemena, što rezultira boljim iskorišćavanjem resursa i smanjenjem troškova proizvodnje.

Sijalice koje se koriste u šumskim rasadnicima dijele se na mobilne, koje mogu biti ručne, traktorske, i samohodne, zatim stacionarne, specijalne, univerzalne, širokosjetvene, trakaste, precizne sijalice (sa precizno definisanim rasporedom pojedinačnih zasijanih semena). Takođe se dijele na sijalice sa mehaničkim (tip valjka, tip kašike, tip ram, tip trake) ili pneumatskim (vakum i nadpritisak) sistemima za sijanje, zatim sa pogonom sistema za sejanje zavisnim ili nezavisnim od brzine kretanja, sa brzinom setve koja se može podešavati neprekidno ili u

koracima itd. Najčešće se koriste polumontažne pokretne sijalice sa mehaničkim valjkastim sistemom za sijanje koji se hidraulično ili mehanički pokreće pomoću točkova. Sjeme se nalazi u posudi za skladištenje koja može biti opremljena okretačem, a pomoću mehanizma za sijanje sjeme se prenosi u kanale i doprema do raonika formirajući brazdu u zemljištu, ili sjeme pada direktno u brazde formirane u zemljištu pomoću valjka za obilježavanje. Primarni zadatak svake sijalice je da sjeme bez oštećenja položi u supstrat prema propisanoj količini, razmaku i dubini.

Precizne mašine za sijanje garantuju da se visok udio sjemena (min 90%) zasije, odnosno rasporedi na određenom razmaku (npr. kvadrat, pravougaonik, trougao), čime se svakoj biljci daje isti prostor za rast. Tehnologije precizne sjetve na lejama mogu biti jedna od mjera racionalizacije u šumskim rasadnicima. U određenim uslovima mogu pomoći u smanjenju presađivanja rasada i zamijeniti ga potkopavanjem korijena rasada iz precizne sjetve, koja je vremenski manje zahtjevna. Međutim, postoji jedan važan uslov koji se mora ispuniti za korišćenje preciznih mašina za sijanje - sjeme mora biti visokog kapaciteta klijanja i čistoće (i jedno i drugo više od 95%), u suprotnom prednosti precizne sjetve su potisnute lošim kvalitetom sjemena.

Sijalice sa pneumatskim mehanizmom za sijanje mogu se smatrati preciznim mašinama za sijanje i obično su projektovane kao sekcione sa svakim dijelom okačenim na noseću gredu pomoću paralelograma i gdje svaka sekcija zasijava jedan red (Slika 8.13). Uobičajeni princip aparata za sijanje ove kategorije mašina je disk vakuum aparat za sijanje. Rotirajući disk ispod kojeg vakuum pumpa uklanja vazduh izvlači sjeme iz posuda tako što ih usisava u otvore, (mlaznice) i prenosi ih u kanal za sjeme iznad raonika gdje se vakuum prekida i sjeme pada u brazdu u zemljištu koje formira raonik za sjeme (valjak za obilježavanje).



Slika 8.13. Pneumatska sijalica Soil Master (www.soilmaster.com)

Mnoge sijalice koje se koriste u šumskim rasadnicima su klasične kompaktne konstrukcije sa mehaničkim mehanizmom za sijanje, pogonjenim preko višebrzinskog (tzv. Norton) menjača preko točka mašine. Primjeri su Egedal 83 i Rath sa mehanizmom za sijanje u obliku valjka i Egedal Combi sa mehanizmom za sejanje u obliku trake. Za preciznu sjetvu sitnog sjemena mogu se koristiti poljoprivredne sijalica Nibek sa mehanizmom za sijanje uz obliku kašike ili Accord Miniair i Fahse Monoair sa vakuum disk pneumatskim sjetvenim mehanizmom. Precizne mašine dizajnirane posebno za rad u šumi su FRI, Hilleshog i dr. Prije svake sjetve sijalica se mora podesiti kako bi se postigla optimalna količina sjemena u skladu s biološkim

zahtjevima, odnosno količina sjemena po jedinici zasijane površine. Postoje normativi koji sa svaku vrstu i različite stanišne uslove propisuju količinu sjemena ili sadnica po dužnom metru ili površini.

8.2.4. Presađivanje

Presađivanje sadnica i drveća je važna faza u procesu uzgoja biljaka, koja omogućava biljkama da se premjeste iz jednog okruženja u drugo radi daljeg razvoja i rasta. Ovaj proces se često koristi kako bi se biljke prenijele iz rasadnika ili kontejnera na njihovo stalno mesto rasta, bilo u bašti, polju, šumi ili u kontejnerima za uređenje prostora. Glavni ciljevi presađivanja su prilagođavanje biljaka novim uslovima, prenošenje zdravog korjenovog sistema i smanjenje stresa koji biljke doživljavaju tokom ovog procesa.

Presađivači se obično sastoje od osnovnog okvira u koji su pričvršćeni mehanizmi za presađivanje (jedan ili više) različitih dizajna i čiji su glavni sastavni dijelovi: bušilica, mehanizam za hranjenje, mehanizam za pokrivanje i sabijanje, ram, sjedišta za operatere, kante za transplantaciju i pomoćnu opremu. Svakom ćelijom upravlja jedna osoba. Mehanizam za hranjenje obezbjeđuje postavljanje biljke u brazdu. Postoje različite konstrukcije mehanizama za hranjenje. Kružni su sa par fleksibilnih, u dijelu obima susjednih diskova - tzv. accord princip ili česta konstrukcija je i na principu diska sa pipcima po obodu. Mogu biti i lančani sa pipcima, kombinovani (elastični diskovi sa primarnim transportnim mehanizmom) i na principu njihanja (za kontejnerske sadnice). Postoje i presađivači bez mehanizma za hranjenje, i to za presađivanje jakih (velikog prečnika) biljaka u tehnologiji uzgoja sadnica koje se ručno postavljaju u brazdu. Biljke (obično sadnice veličine cca. 15 - 20 cm) se najčešće stavljaju ručno u mehanizam za hranjenje. Mehanizam za hranjenje prenosi sadnice u brazdu gde se biljka pritišće i prekriva zemljom pomoću točkova za pritisak. Mehanizam za pokrivanje zemljom i pritiskanje obično se sastoji od dva gumena ili čelična točka koja su postavljena okomito ili koso uz strane brazde, koji bacaju zemlju sa zidova brazde na korijenje postavljenih biljaka i tako ih pokrivaju i zbijaju. Presađivače obično vuče traktor, a rjeđe je samohodan. Radna brzina sa ručnim prihranjivanjem biljaka je oko 150-250 m/h i njihov učinak je do 9.000 sadnica po osobi i smjeni.

RATH Machinen i Egedal su dva renomirana proizvođača opreme za šumarsko rasadničarstvo, specijalizovana za različite tipove mašina i priključaka. RATH Machinen je 1973. godine počeo proboj na tržištu rasadničarske opreme s dva specifična sistema. Prvi sistem obuhvata specijalni samohodni kultivator ili specijalizovani traktor dizajniran za rasadničarsku proizvodnju, uz dodatne priključke koji se montiraju na hidraulički podizač ili traktorsko vratilo. Drugi sistem nudi priključne mašine koje se pogone preko traktora. S druge strane, Egedal iz Danske se fokusira na razvoj i proizvodnju nošenih priključaka, čime obezbjeđuje specifična rješenja za različite potrebe u šumarskom rasadničarstvu.

Presađivači RATH/Schifter i Egedal MS imaju oblik specijalnog traktora sa alatom koji pokreće dizel motor. Moduli za presađivanje su pričvršćeni kružnim mehanizmom za hranjenje sa preciznim poluautomatskim pipcima duž oboda. Dvoredni Egedal B ili petoredni Egedal M presađivači se montiraju kao traktorski priključak u tri tačke, a takođe imaju kružne

mehanizme za hranjenje sa poluautomatskim pipcima. Tehnologija rada i proizvodnje je slična kao kod vučenih presađivača. Presađivači Accord (Nemačka), Egedal C ili Egedal MT imaju mehanizme za hranjenje koji se sastoje od dva fleksibilna diska između kojih se postavljaju biljke i prenose ih u brazdu (Slika 8.14).



Slika 8.14. Egedal Tip M presađivač (https://egedal.dk/)

Jedna od najprepoznatljivijih višenamjenskih mašina u rasadničarstvu je RATH MASTERTRAC (Slika 8.15) (Tabela 8.1). To je samohodni nosač alata visokog klirensa koji omogućuje odličan predgled radne površine od strane operatera. Priključci su postavljeni između osovina što poboljšava preciznost. Operater kontroliše MASTERTRAC pomoću jedne kontrolne poluge (džojstik). Sa kontinuiranom varijabilnom transmisijom je u pravoj radnoj brzini pri konstantnim obrtajima motora. Hidrostatski prenos snage visokog obrtnog momenta obezbjeđuje više od 90% obrtnog momenta praktično od pokretanja. Pogon na sve točkove mu daje odličnu kontrolu vuče.

Tabela 8.1. Tehničke karakteristike RATH MASTERTRAC

Motor	60 hp 3H50TICD HATZ- Dizel, vodeno hlađenje, moderan dizel motor sa common-rail kontrolom, EU-emisioni standard STAGE V, opciono 4H50TICD sa 80ks
Pogon	Pogon na 2 točka ili stalni 4WD sa beskonačno promenljivom regulacijom brzine od 0 - 25km/h, po želji do 30km/h
Zahvat	1,5 - 2,0 m
Klirens	70 - 120 cm
Masa	2.500 kg neto-osnovna težina 4.000 kg ukupna težina
PTO	Nezavisno kolo sa 75 l/min pri maks. 250 bara, Uljni motor sa PTO-profilom - beskonačno regulisana brzina
Gume	Zadnje gume 230/85 R36 ili 270/95 R32 prednji 6,50-16 (2VD) 7,50-20 (4VD)



Slika 8.15. RATH MASTERTRAC verdura/silva (www.rath-maschinen.com)

Literatura:

Afsah-Hejri, L., Homayouni, T., Toudeshki, A., Ehsani, R., Ferguson, L., & Castro-García, S. (2022). Mechanical harvesting of selected temperate and tropical fruit and nut trees. Horticultural Reviews, 49, 171-242.

da Silva Correia, T. P., Lopes, A. G. C., Faggion, F., de Brito, G. R., & de Sousa, S. F. G. (2020). PERFORMANCE OPERATIONAL AND COSTS OF MECHANIZED STUMP EXTRACTION SETS. Revista Engenharia na Agricultura-REVENG, 28(Contínua), 326-335.

Donahue, P. K., & Wood, T. M. (1995). A safe, flexible and non-injurious technique for climbing tall trees. Selbyana, 16(2), 196–200. http://www.jstor.org/stable/41759907

Farinelli, D., Ruffolo, M., Boco, M., & Tombesi, A. (2008). Yield efficiency and mechanical harvesting with trunk shaker of some international olive cultivars. In VI International Symposium on Olive Growing 949 (pp. 379-384).

Longo, D., Caruso, L., Conti, A., Camillieri, D., & Schillaci, G. (2013). A survey of safety issues in tree-climbing applications for forestry management. Journal of Agricultural Engineering, 44(s2).

Sanchez-Cachinero, P., Luque-Mohedano, R., & Sola-Guirado, R. R. (2022). Computational model for the dynamic characterisation of a trunk shaker. Agriculture, 12(12), 2158.

Schmidt, L. (2007). Seed collection. Tropical Forest Seed, 7-65.

Stubsgaard, F. (1997). Tree climbing for seed collection: techniques and equipment. 1-48 https://curis.ku.dk/ws/files/33049474/TN44.pdf

Zhou, J., He, L., Du, X., Chen, D., Zhang, Q., & Karkee, M. (2012). Dynamic response of sweet cherry tree to the vibration of a limb shaker. In 2012 Dallas, Texas, July 29-August 1, 2012 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

9. MAŠINE ZA GRADNJU I ODRŽAVANJE ŠUMSKIH PUTEVA

Mašine za gradnju šumskih puteva su neophodne u šumarstvu osiguravajući pristupačnost i održivost šumskih resursa kroz izgradnju i održavanje infrastrukture neophodne za efikasano gazdovanje. Ove mašine su specijalno dizajnirane da izdrže ekstremne uslove rada, uključujući strme terene i različite klimatske uslove, čime se omogućava izgradnja puteva čak i u najnepristupačnijim područjima. Razvoj tehnologije u oblasti mašina za gradnju šumskih puteva doveo je do stvaranja sofisticiranih uređaja koji moraju izvršavati najzahtjevnije zadatke. Bageri, buldožeri, grejderi i specijalizovani kamioni opremljeni su naprednim hidrauličnim sistemima, GPS tehnologijom i sistemima za praćenje terena, što omogućava precizno planiranje i realizaciju izgradnje puteva. Efikasnost mašina za gradnju šumskih puteva nije samo u njihovoj sposobnosti da brzo i precizno obavljaju zadatke, već i u njihovom doprinosu očuvanju životne sredine. Moderni bageri i buldožeri su opremljeni ekološki prihvatljivim motorima koji smanjuju emisiju štetnih gasova, dok napredni sistemi za kontrolu erozije i stabilizaciju tla smanjuju negativan uticaj na ekosistem. Ova tehnološka dostignuća omogućavaju da se putevi grade na način koji minimalno narušava prirodni pejzaž i biodiverzitet šumskih područja. Uzimajući u obzir ekološke i socijalne funkcije šume, optimizacija mreže puteva smanjuje ekološke štete i poboljšava održivo gazdovanje šumama (Hrůza, 2003).

Kvalitetno izgrađeni šumski putevi su ključni za transport drveta, ali i za ostale aktivnosti poput gašenja šumskih požara ili hitne medicinske pomoći. Putevi omogućavaju lakši pristup šumskim područjima za sprovođenje različitih aktivnosti gazdovanja šumama, uključujući pošumljavanje, kontrolu štetočina i održavanje zdravlja šumskih ekosistema (Laschi et al., 2019). Održavanje ovih puteva zahtijeva kontinuirano angažovanje specijalizovanih mašina koje osiguravaju njihovu prohodnost i funkcionalnost tokom cijele godine.

U šumarstvu se za gradnju i održavanje šumskih puteva koriste sljedeće mašine: bageri, buldožeri, grejderi, vibrovaljci, rovokopači, utovarivači, kamioni kiperi, finišeri, traktori sa priključcima za održavanje puteva, valjci za sabijanje tla i cisterni za polijevanje prašine i gašenje požara. Odabir odgovarajućih mašina je važan zbog toga što direktno utiče na sastojinu, npr. buldožeri prouzrokuju veće štete na šumskim ekosistemima u odnosu na bager, posebno u pogledu oštećenja drveća i gubitka šumskih površina (Caliskan, 2013).

9.1. Bageri

Bageri su građevinske mašine koje se koriste za iskopavanje, pomjeranje i utovar materijala kao što su zemlja, pijesak, šljunak i kamenje (Chacko et al., 2014). Opremljeni su hidrauličnim sistemima i obično imaju rotirajuću kabinu i ruku s kašikom ili drugom priključnom opremom na kraju. Bageri se koriste u raznim industrijama, uključujući građevinu, rudarstvo i šumarstvo, zbog svoje svestranosti i sposobnosti da rade u teškim uslovima. Bageri se u šumarstvu mogu koristiti na različitim mjestima i u različite svrhe. Koriste se za izgradnju i održavanje šumskih puteva, omogućavajući pristup teškim i nepristupačnim područjima (Parsakhoo et al, 2008). Takođe, bageri su korisni za pripremu terena prije pošumljavanja, uključujući uklanjanje panjeva, korijenja i velikog kamenja. U poslovima zaštite šuma, bageri se koriste za izgradnju

protivpožarnih linija i barijera kako bi se spriječilo širenje šumskih požara. Bageri su također korisni u radovima na obnavljanju degradiranih šumskih područja, gdje mogu pomoći u iskopavanju i ravnanju zemljišta za ponovnu sadnju ili obnavljanje vodenih tokova. Ove mašine se koriste i za izgradnju infrastrukture kao što su stovarišta, odvodni kanali i jame za odlaganje otpada.

Bageri se mogu klasifikovati s obzirom na konstrukciju i način rada, i obično se mogu podijeliti na hidraulične bagere, gusjeničare, točkaše, mini bagere, dreglajn bagere, kašikare, usisne bagere i bagere s lancima. Hidraulični bageri su najčešći tip, i koriste hidraulične sisteme za podizanje i spuštanje ruke te za kontrolu kašike. Gusjeničari se kreću pomoću gusjenica umjesto točkova, što ih čini stabilnim i pogodnim za rad na neravnom terenu i u teškim uslovima. Bageri točkaši koriste točkove za kretanje, pružajući veću brzinu i lakše manevrisanje po asfaltiranim i glatkim površinama, ali s manjom stabilnošću u odnosu na gusjeničare.

Mini bageri su manje verzije hidrauličnih bagera, idealne za rad u skučenim prostorima i za manje poslove, zbog svoje lakoće transporta i manevrisanja. Dreglajn bageri su opremljeni dreglajn kašikom koja visi s kraja duge ruke, što ih čini pogodnim za iskopavanje u vodi i vađenje materijala iz velikih dubina. Kašikari, sa kašikama koje se nalaze na rotirajućem bubnju, se koriste za kopanje velikih količina materijala u rudnicima i kamenolomima. Usisni bageri koriste vakuumski sistem za usisavanje zemlje i materijala, što ih čini idealnim za rad na mjestima gdje je potrebna visoka preciznost i gdje tradicionalno kopanje nije moguće. Bageri s lancima, opremljeni kašikama s lancima, koriste se za kontinuirano iskopavanje i prenošenje materijala na pokretne trake.

Rovokopači su srodni bagerima i to su specijalizovane građevinske mašine koje se koriste za kopanje rovova, iskopavanje temelja, postavljanje cijevi i kablova, te za druge vrste zemljanih radova. Opremljeni su kašikom na kraju krana, omogućavajući kopanje rovova različitih dubina i širina. Među poznatijim proizvođačima bagera u svijetu su Caterpillar, Komatsu, Hitachi Construction Machinery, Volvo Construction Equipment, John Deere, i dr. Tehničke karatkeristike 3 modela su prikazane u Tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Tehničke karakteritike tri modela bagera

Proizvođač	Model	Težina (kg)	Snaga motora (kW)	Maksimalna dubina kopanja (m)	Kapacitet kašike (m^3)	Domet krana (m)	Visina utovara (m)	Kapacitet rezervoara (l)	Širina (m)	Visina (m)
Komatsu	PC210-10	21800	123	6.62	1.2	9.92	6.75	400	2.8	3.05
Volvo	EC220E	23000	129	6.73	1.1	10.16	6.87	350	2.9	3.1
John Deere	210G LC	23200	119	6.67	1.19	10.21	6.93	400	2.95	3.15



Slika 9.1. Caterpillar bager (www.fs.usda.gov)

9.2. Buldozeri

Buldozeri su teške građevinske mašine koje se koriste za pomjeranje velikih količina zemlje, stijena, pijeska ili drugih materijala. Opremljeni su velikom metalnom oštricom na prednjem dijelu, koja se može podizati, spuštati i naginjati pod različitim uglovima radi efikasnog pomjeranja materijala. Buldozeri su obično montirani na gusjenice, što im omogućava stabilnost i manevrisanje po neravnom i teškom terenu. U šumarstvu, buldozeri se koriste u različitim poslovima gazdovanja šumama i šumarskim radovima (Asli et al., 2015). Njihova primjena uključuje izgradnju i održavanje šumskih puteva, gdje su neophodni za uklanjanje drveća, panjeva i velikih stijena, te za nivelaciju terena (Ozturk et al., 2009). Takođe, buldozeri se koriste za pripremu zemljišta za pošumljavanje, što uključuje čišćenje terena od vegetacije i pripremu zemljišta za sadnju. U zaštiti šuma, buldozeri igraju ključnu ulogu u izgradnji protivpožarnih linija i barijera, koje su od vitalnog značaja za sprečavanje širenja šumskih požara. Njihova sposobnost da brzo raščiste velike površine zemlje omogućava efikasno stvaranje ovih linija zaštite. Pored toga, buldozeri se koriste u radovima na sanaciji i obnovi šumskih područja koja su oštećena prirodnim nepogodama ili ljudskim aktivnostima. Ovo uključuje uklanjanje oštećenog drveća, popravljanje erodiranih područja i izgradnju potrebne infrastrukture za obnovu šumskog ekosistema .

Buldozeri se mogu klasifikovati na različite načine s obzirom na konstrukciju i način rada. Buldozeri se mogu klasifikovati prema vrsti i položaju oštrice na nekoliko načina. S ravnom oštricom (eng. straight blade) imaju oštricu bez zakrivljenosti ili bočnih krilaca, što je čini pogodnom za izravnavanje terena i pomjeranje materijala na kratke udaljenosti. S univerzalnom oštricom (eng. universal blade) imaju široku i zakrivljenu oštricu, s bočnim krilcima koja pomažu u držanju većih količina materijala, i idealna za premještanje materijala na veće udaljenosti. Poluunivrzalna oštrica (eng. semi-universal blade) predstavlja kombinaciju ravne i zakrivljene oštrice sa kratkim bočnim krilcima, pružajući dobar balans između kapaciteta i sposobnosti preciznog rada. Angldozeri (eng. angle dozer) imaju oštricu koja se može zakretati u stranu, omogućavajući pomjeranje materijala na određenu stranu, što je korisno za zadatke gdje je potrebno usmjeravanje materijala. Cushion Blade oštrica je dizajnirana za rad u rudnicima i kamenolomima, apsorbuje udarce i pritisak, pogodna za teške zadatke. Power-Angle-Tilt Blade (PAT Blade) omogućava podešavanje u različite položaje,

uključujući podizanje, spuštanje, zakretanje i naginjanje, pružajući veliku fleksibilnost i svestranost u radu. Ove različite vrste i položaji oštrica omogućavaju buldozerima da budu prilagodljivi i efikasni u širokom spektru zadataka, od ravnanja terena do premještanja velikih količina materijala i specijalizovanih operacija.

Zavisno o vrsti pogona i načinu kretanja buldozeri se dijele na točkaše i gusjeničare. Točkaši su buldozeri koji se kreću na točkovima i poznati su po većoj mobilnosti i brzini na tvrdim i glatkim površinama. Zbog točkova, točkaši se mogu brže premještati s jednog radnog mjesta na drugo, što ih čini idealnim za rad u urbanim sredinama i na projektima gdje je potrebno često premještanje mašine. Međutim, oni su manje stabilni na mekanim ili neravnim terenima u poređenju s gusjeničarima koji se kreću pomoću gusjenica umjesto točkova. Gusjenice omogućavaju bolju raspodjelu mase, pružajući veću stabilnost i manju vjerovatnoću zaglavljivanja na mekim, neravnim ili blatnjavim terenima. Gusjeničari su idealni za rad u teškim uslovima, kao što su šumarstvo, građevinarstvo i rudarstvo. Gusjenice im omogućavaju da se lakše kreću po različitim vrstama terena, uključujući strme padine i blatnjave površine, ali su sporiji i manje mobilni na tvrdim površinama u poređenju s točkašima. Mini buldozeri su verzije standardnih buldozera, dizajnirane za rad na manjim prostorima za manje projekte i za rad u urbanim područjima gdje su veći buldozeri nepraktični.

Savremene tehnologije u buldozerima uključuju napredne sisteme automatizacije, telematike i ekološki prihvatljive pogonske sisteme. Sistemi automatizacije, kao što su GPS i 3D sistemi za kontrolu i navođenje, omogućavaju preciznije kopanje i nivelaciju terena, smanjujući potrebu za manuelnim radom i povećavajući efikasnost (Mathur et al., 2024). Telematika omogućava praćenje performansi mašina u realnom vremenu, pružajući podatke o potrošnji goriva, lokaciji, radnim satima i stanju mašine, što pomaže u optimizaciji rada i održavanja. Hibridni i električni pogonski sistemi su među najnovijim tehnološkim dostignućima. Integracija senzora i IoT (Internet of Things) tehnologije omogućava prediktivno održavanje, gdje senzori prate stanje ključnih komponenti i predviđaju kvarove prije nego što se dogode, čime se smanjuju zastoji i troškovi popravki.

Među poznatijim proizvođačima buldozera u svijetu su: Caterpillar, Komatsu, John Deere, Liebherr, Volvo Construction Equipment, Shantui i dr.

Tabela 9.2. Tehničke karakteristike tri modela buldozera

Proizvođač	Model	Težina (kg)	Snaga motora (kW)	Maksimalna dubina kopanja (m)	Kapacitet oštrice (m^3)	Domet kopanja (m)	Visina utovara (m)	Kapacitet rezervoara (l)	Širina (m)	Visina (m)
Caterpillar	D6 XE	24500	161	1.1	6.8	4	3.5	416	3.3	3.4
Komatsu	D155AX-8	41700	264	1.5	9.4	4.8	4	600	3.5	3.6
Shantui	SD32	37200	235	1.2	9.2	4.5	3.8	600	3.4	3.6



Slika 9.2. Shantui SD32 buldozer (www.shantui.net)

9.3. Grejderi

Grejderi su teške građevinske mašine koje se koriste za fino nivelisanje i oblikovanje površine zemljišta (Otsuki, 2020). Opremljeni su dugim radnim nožem, koje se može podešavati po visini, uglu i nagibu kako bi se postigao željeni oblik terena. Grejderi se najčešće koriste za izravnavanje puteva, pripremu temelja za građevinske projekte, održavanje neasfaltiranih puteva, te za uklanjanje snijega i leda s puteva. Osim glavnog noža, mnogi grejderi imaju dodatne priključke kao što su riperi za razbijanje tvrdog zemljišta, te različite vrste noževa i rotirajućih četki za specifične zadatke.

Grejderi se u šumarstvu koriste za izgradnju i održavanje šumskih puteva, gdje se koriste za izravnavanje i oblikovanje puteva (Penti. 2023). Također, grejderi se koriste za pripremu terena prije sadnje šuma ili drugih šumskih aktivnosti, jer njihova sposobnost preciznog oblikovanja terena čini ih idealnim za stvaranje površina pogodnih za sadnju. Osim toga, igraju ulogu u redovnom održavanju pristupnih puteva unutar šumskih područja, uklanjaju rupe, izravnavaju površine i čiste puteve od raznih ostataka.

Grejderi se mogu klasifikovati prema konstrukciji i tehničkim karakteristikama. Prva klasifikacija ih dijeli na motorne grejdere, koji imaju vlastiti pogon, i vučne grejdere, koji zahtijevaju vuču od strane traktora ili drugog vozila. Motorni grejderi su najčešće korišćeni jer omogućavaju veću autonomiju i fleksibilnost u radu. S obzirom na tehničke karakteristike, grejderi se mogu podijeliti prema veličini i kapacitetu. Mali grejderi, dizajnirani za lakše zadatke i rad na manim prostorima, imaju manju snagu motora i manji radni nož. Srednji grejderi su pogodni za širok spektar radova u građevinarstvu i održavanju puteva, dok veliki grejderi posjeduju visoku snagu motora i veliki radni nož, te se koriste za teške zadatke kao što su izgradnja puteva i priprema terena za velike projekte.

Radni dio grejdera je nož koji se nalazi ispod središnjeg dijela mašine između prednjih i zadnjih točkova. Nož je montiran na okvir mašine koji omogućava njegovo pomjeranje u različitim smjerovima. Može se podizati i spuštati radi podešavanja dubine, zakretati lijevo ili desno za bočno pomjeranje materijala, i naginjati kako bi se postigao željeni profil terena. Kontrole za upravljanje radnim nožem nalaze se unutar kabine grejdera, gdje operater može precizno podešavati položaj i ugao.

Moderni grejderi koriste niz naprednih sistema, neki od najvažnijih su:

- GPS i 3D sistemi za kontrolu mašina koji omogućavaju precizno nivelisanje i oblikovanje terena. Ovi sistemi koriste satelitsku navigaciju i digitalne modele terena kako bi operaterima omogućili da postignu tačne specifikacije projekta s minimalnim greškama i potrebom za ručnim mjerenjima.
- Automatizovani sistemi za kontrolu položaja noža koji pružaju mogućnost podešavanja položaja i ugla noža prema unaprijed definisanim parametrima.
- Telematika koja omogućava praćenje performansi mašine u realnom vremenu. Ovi sistemi pružaju podatke o lokaciji, potrošnji goriva, radnim satima i stanju mašine, što pomaže u optimizaciji rada i održavanja. Telematika također omogućava daljinsku dijagnostiku problema, što može smanjiti vrijeme zastoja i troškove popravki.
- Senzori i kamere povećavaju sigurnost i preglednost. Senzori mogu detektovati prepreke i upozoriti operatera na moguće opasnosti, dok kamere pružaju bolji pregled okoline.

Tabela 9.3. Tehničke karakteristike tri grejdera

Proizvođač	Model	Težina (kg)	Snaga motora (kW)	Dužina noža (m)	Širina noža (m)	Visina noža (m)	Maksimalna brzina (km/h)	Ukupna dužina (m)	Širina (m)	Visina (m)
Caterpillar	140H	15430	128	3.7	0.64	0.51	45	8.1	2.5	3.3
John Deere	770G	16350	191	3.96	0.65	0.52	44	8.4	2.7	3.4
XCMG	GR180	15400	140	3.9	0.7	0.53	42	8.3	2.6	3.4



Slika 9.3. John Deer 770G (www.deere.com)

9.4. Valjci

Valjci su građevinske mašine koje se koriste za zbijanje zemljišta, asfalta, šljunka i drugih materijala kako bi se stvorila čvrsta, ravna i stabilna površina. Ove mašine se koriste u raznim fazama građevinskih projekata, uključujući izgradnju puteva, aerodroma, nasipa i drugih infrastrukturnih objekata.

Ove mašine su opremljene velikim valjcima ili bubnjevima koji se kotrljaju preko materijala, primjenjujući pritisak i vibracije kako bi sabijali materijal i eliminisali praznine i vazdušne džepove. Postoji nekoliko tipova valjaka, a najčešći su:

- Statički valjci: Koriste težinu mašine za zbijanje materijala. Oni se uglavnom koriste za zbijanje sitnih zrna i asfaltnih slojeva.
- Vibracioni valjci: Opremljeni su mehanizmom za vibriranje koji dodatno poboljšava proces zbijanja, čineći ih pogodnim za širok spektar materijala, uključujući zemlju, pijesak, šljunak i asfalt.
- Gumeni valjci: Imaju gumene umjesto čeličnih bubnjeva. Koriste se za završno zbijanje asfalta jer pružaju glađu završnu obradu.
- Tandem valjci: Imaju dva bubnja (prednji i zadnji) koji se koriste za zbijanje asfalta i drugih površinskih materijala.
- Valjci s jastucima: Koriste gumene jastuke na bubnjevima za zbijanje materijala bez oštećenja površine.

Valjci se mogu podijeliti i na:

- Jednovaljne valjke (eng. single-drum rollers), koji imaju jedan bubanj na prednjem dijelu i točkove na zadnjem dijelu. Koriste se za zbijanje zemljišta i podloga, naročito u pripremi temelja i puteva.
- Dvovaljni valjci (eng. double-drum rollers), koji imaju dva bubnja, jedan na prednjem i jedan na zadnjem dijelu. Pogodni su za zbijanje asfalta i stvaranje glatkih površina.
- Osovinski valjci (eng. pneumatic rollers), koji su opremljeni sa više pneumatskih točkova koji pružaju fleksibilnost i pritisak na zemljište. Koriste se za zbijanje asfalta i podloga, a često se koriste u završnim fazama izgradnje puteva.
- Rovokopači-valjci (eng. padfoot rollers): Imaju bubnjeve sa izbočinama (jastucima) koji omogućavaju dublje zbijanje. Koriste se za zbijanje teških glinovitih zemljišta i u pripremi temelja.

Među poznatijim proizvođačima valjaka u svijetu su: Bomag, Caterpillar, Dynapac, Volvo Construction Equipment, Hamm, Ammann, Sakai, JCB i dr.

Tabela 9.4. Tehničke karakteristike tri valjka

Proizvođač	Model	Težina (kg)	Snaga motora (kW)	Širina valjka (m)	Vibracijska frekvencija (Hz)	Centrifugalna sila (kN)	Amplituda (mm)	Visina (m)
Volvo	SD110C	11100	74	2.13	30	249	1.9	3.1
Bomag	BW 213 DH-5	12365	119	2.13	30	240	2	3.1
Caterpillar	CB10	10520	98	1.7	32	150	1.7	2.8



Slika 9.4. Volvo SD110C valjak (www.volvoce.com)

9.5. Mulčeri

Malčeri su mašine konstruisane za sječu, usitnjavanje i mljevenje materijala kao što su drveće, grmlje i grane. To su univerzalne mašine za uklanjanje neželjene šumske i žbunaste vegetacije, usitnjavanje drvnih ostataka nakon sječe, te za čišćenje zaštitnih pojaseva, vatrogasnih linija, električnih nadzemnih i podzemnih kablova, i drugih sličnih zadataka (Marinov et al., 2023). Koriste rotirajuće noževe ili čekiće montirane na bubanj ili disk, koji se vrte velikom brzinom kako bi usitnili materijal na sitne komadiće. Tehnologije malčiranja imaju ekološke i tehnološke prednosti u poređenju sa buldožerskim tehnologijama (Marinov, 2014). Malčeri mogu biti montirani na razne traktore i druge mašine, ili mogu biti samohodni. Uloga malčera pri izgradnji šumskih puteva je višestruka. Prvo, malčeri se koriste za čišćenje trase puta od vegetacije, što uključuje uklanjanje drveća, grmlja i drugog biljnog materijala koji ometa prolaz i radove. Ovo omogućava nesmetan pristup teškim građevinskim mašinama i vozilima potrebnim za građevinsku izgradnju puta. Drugo, malčeri usitnjavaju vegetaciju na sitne dijelove koji se mogu koristiti kao organski malč. Ovaj malč se može ostaviti na tlu kako bi se smanjila erozija, poboljšala struktura tla i zadržala vlaga, što je od značaja za očuvanje ekosistema tokom i nakon izgradnje puta. Korišćenje malčera smanjuje potrebu za ručnim radom i upotrebom hemikalija za uklanjanje vegetacije, što doprinosi efikasnosti i ekološkoj održivosti procesa izgradnje šumskih puteva. Takođe, usitnjavanje biljnog materijala na licu mjesta smanjuje potrebu za njegovim odvoženjem, čime se smanjuju troškovi i emisija gasova iz transporta.

Među poznatim proizvođačima malčera ističu se FAE Group, SEPPI M. i Fecon. Neki od njihovih modela su:

- FAE UML/EX: Dizajniran za rad sa bagerima, pogodan za usitnjavanje grmlja i drveća do prečnika od 20 cm.
- FAE UML/DT: Montiran na traktore, pogodan za usitnjavanje vegetacije na poljoprivrednim i šumskim područjima.
- SEPPI M. BMS: Montiran na bager, koristi se za usitnjavanje drveća i grmlja do prečnika od 30 cm.
- SEPPI M. STARFORST: Montiran na traktore, ovaj model je dizajniran za teške radove u šumarstvu, sposoban za usitnjavanje stabala do prečnika od 50 cm.

- Fecon FTX150: Samohodni malčer, idealan za teške šumske radove i usitnjavanje drveća do prečnika od 20 cm.
- Fecon BH74SS: Montira se na traktore i bageri, pogodan za usitnjavanje grmlja i drveća do prečnika od 25 cm.





Slika 9.5. Malčer na bageru FAE UML/EX/VT (www.fae-group.com) Slika 9.6. Malčer za traktorom FAE UML/DT - FML/DT (www.fae-group.com)

9.6. Mašine za usitnjavanje kamena

Mašine slične malčerima, koje se koriste za usitnjavanje materijala pri gradnji puteva, su drobilice kamena (eng. stone shredder). Drobilice su mašine konstruisane za razbijanje krupnijih komada stijena i kamena na manje dijelove, pogodne za upotrebu u građevinskim radovima. Postoji nekoliko tipova drobilica, među kojim su najčešće:

- Čeljusne drobilice, koriste fiksne i pokretne čeljusti koje se približavaju i razdvajaju kako bi razbile kamen. Ove drobilice su pogodne za primarno drobljenje velikih komada.
- Konusne drobilice, koriste konusne površine za drobljenje kamena između ekscentričnog konusa i konkavnog korita. Ove drobilice se često koriste za sekundarno i tercijarno drobljenje, gde je potrebna finija obrada materijala.
- Valjkaste drobilice imaju dva valjka koji se rotiraju u suprotnim smjerovima i razbijaju kamen prolaskom između valjaka. Ove drobilice su efikasne za srednje i sitnije drobljenje materijala.
- Impaktne drobilice koriste rotirajuće rotore s udarnim pločama ili čekićima kako bi usitnili kamen udarom. Ove drobilice su efikasne za proizvodnju finijih frakcija kamena i peska.

Mobilne drobilice omogućavaju drobljenje kamena direktno na gradilištu, što smanjuje potrebu za transportom materijala i povećava efikasnost. One mogu biti opremljene različitim vrstama mehanizama za drobljenje, kao što su čeljusni, konusni i impaktni mehanizmi.

Mašine slične drobilicama kamena su sjeckalice (eng. shredder) i mlinovi (eng. grinder).

Sjeckalica je mašina koja se koristi za usitnjavanje i sjeckanje različitih materijala, uključujući drvo, plastiku, metal i otpad. Primarno se koristi u reciklažnoj industriji za smanjenje zapremine otpada i pripremu materijala za dalju obradu ili reciklažu. Shredderi koriste rotirajuće noževe ili čekiće koji usitnjavaju materijal na manje komadiće. Postoje različite vrste

"shredder"-a, uključujući jednostepene i višestepene shredder-e, koji se razlikuju po složenosti i kapacitetu.

Mlin je mašina koja se koristi za fino usitnjavanje i mljevenje materijala do praha ili sitnih čestica. Koristi se u raznim industrijama, uključujući prehrambenu, farmaceutsku, i rudarsku industriju. "Grinder"-i mogu biti horizontalni, vertikalni ili kuglični mlinovi, a svi funkcionišu putem trenja i udara kako bi se materijal usitnio do željene veličine čestica.

U suštini, drobilica je specifično dizajnirana za drobljenje kamena, sjeckalica za usitnjavanje širokog spektra materijala, dok je mlin za fino usitnjavanje i mljevenje materijala do praha ili sitnih čestica.

Među poznatim proizvođačima drobilica kamena su Metso Outotec, Sandvik, Terex Corporation (Powerscreen, Terex Finlay), Kleemann (Wirtgen Group), PTH Products Maschinenbau G.m.b.H. i Thyssenkrupp Industrial Solutions. Poznati proizvođači sjeckalica su npr. Vecoplan AG, UNTHA i Lindner-Recyclingtech GmbH. Proizvođači mlinova (grinder) su Fritsch GmbH, Hosokawa Alpine AG i Retsch GmbH.



Slika 9.7. Usitnajvanje kamena pri izgradnji šumskog puta (www.groupegedic.com)

9.7. GPS u gradnji puteva

Primjena GPS tehnologije u izgradnji šumskih puteva donosi revoluciju u načinu na koji se ovi infrastrukturni projekti planiraju, izvode i održavaju. GPS (Global Positioning System) omogućava precizno određivanje položaja bilo gdje na Zemlji, što je od neprocjenjive vrijednosti za radove u često nepristupačnim i teško dostupnim šumskim područjima.

Jedna od glavnih prednosti upotrebe GPS-a u izgradnji šumskih puteva je mogućnost preciznog planiranja trase. Prije početka bilo kakvih radova, GPS uređaji omogućavaju inženjerima i planerima da mapiraju teren s visokim stepenom tačnosti. Ovo uključuje identifikaciju optimalnih ruta koje izbjegavaju prirodne prepreke kao što su rijeke, jezera, i strme padine, a istovremeno minimizirajući uticaj na okolinu. Korišćenjem GPS-a, moguće je kreirati detaljne digitalne mape koje prikazuju topografske karakteristike terena, što olakšava donošenje odluka o trasi budućeg puta.

Tokom same izgradnje, GPS tehnologija omogućava efikasnu navigaciju i vođenje radnih mašina. Mašine kao što su buldožeri, rovokopači, i drobilice kamena mogu biti opremljene

GPS uređajima koji prate unaprijed određene rute s visokim stepenom tačnosti. Ovi uređaji pružaju operaterima tačne informacije o njihovom trenutnom položaju i smjeru, smanjujući mogućnost grešaka i osiguravajući ravnomjernu i pravilnu izgradnju puteva.

Primjeri GPS uređaja za vođenje mašina:

- Trimble GCS900: Ovaj sistem pruža 3D kontrolu mašina koristeći GPS i GNSS tehnologiju, omogućavajući precizno vođenje mašina u stvarnom vremenu.
- Topcon 3D-MC: Ovaj sistem koristi GNSS i inercijalne senzore za pružanje tačnih podataka o položaju i visini mašina, što rezultira visokom preciznošću u izgradnji puteva.
- Leica iCON iXE3: Ovaj GPS sistem za kontrolu mašina omogućava automatsko vođenje bagera i drugih građevinskih mašina, poboljšavajući efikasnost i preciznost radova.

GPS uređaji instalirani na građevinske mašine pružaju tačne podatke o položaju, udaljenosti i obavljenom poslu, što omogućava menadžerima projekata da prate napredak radova iz centralne kancelarije ili putem mobilnih aplikacija. Ovo omogućava bolju kontrolu nad projektom, brže donošenje odluka i efikasnije upravljanje resursima.

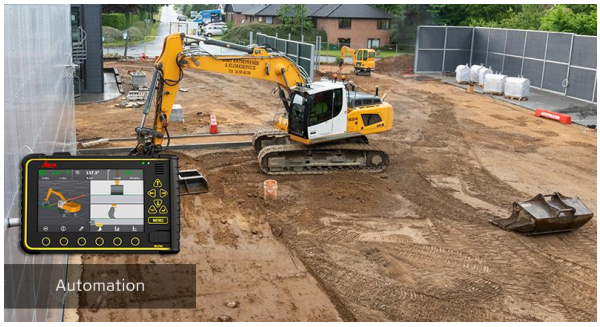
Korišćenje GPS tehnologije pomaže u optimalnom korišćenju resursa kao što su materijali, gorivo i radna snaga. Praćenjem tačnog položaja mašina i radnika, menadžeri mogu efikasnije rasporediti resurse, smanjujući troškove i povećavajući produktivnost. Na primjer, GPS uređaji mogu pratiti potrošnju goriva građevinskih mašina, identifikovati područja gdje se može uštedjeti gorivo i smanjiti emisije štetnih gasova.

Sigurnost je još jedan važan aspekt gdje GPS tehnologija igra ključnu ulogu. GPS omogućava bolju koordinaciju i komunikaciju između radnih timova, smanjujući rizik od nesreća. U slučaju vanrednih situacija, tačne GPS koordinate mogu pomoći hitnim službama da brzo pronađu i pruže pomoć ugroženim radnicima. Takođe, GPS uređaji mogu pratiti kretanje mašina i radnika u realnom vremenu, omogućavajući menadžerima da identifikuju potencijalno opasna područja i preduzmu potrebne mjere opreza.

GPS podaci se mogu koristiti za izradu detaljnih digitalnih mapa i dokumentacije o izgrađenim putevima. Ove mape mogu uključivati informacije o položaju puteva, strukturi tla, drenaži i drugim relevantnim detaljima. Digitalne mape olakšavaju buduće održavanje puteva, omogućavajući brzo i efikasno pronalaženje i popravku oštećenja.

Primjeri GPS uređaja za mapiranje i dokumentaciju:

- Garmin GPSMAP 66s: Ovaj ručni GPS uređaj je idealan za mapiranje terena i prikupljanje podataka na terenu. Pruža visoku preciznost i dugotrajnu bateriju, što ga čini pogodnim za dugotrajne radove na otvorenom.
- Trimble Geo 7X: Ovaj uređaj nudi napredne funkcije za geodetska mjerenja i mapiranje, uključujući visoku preciznost i mogućnost rada u teškim uslovima.
- Leica Zeno 20: Ovaj GPS uređaj kombinuje visoku preciznost sa lakim korišćenjem, omogućavajući brzo prikupljanje i obradu geodetskih podataka.



Slika 9.8. Leica iCON iXE3 GPS za vođenje mašina



Slika 9.9. Garmin GPSMAP 66s – ručni GPS

Korišćenje GPS tehnologije za trasiranje traktorskih vlaka donosi brojne prednosti, uključujući povećanu preciznost, efikasnost i sigurnost u radu. Precizno trasiranje ovih trasa je od suštinske važnosti za smanjivanje uticaja na okolinu i povećanje produktivnosti. GPS uređaji omogućavaju inženjerima i šumarima da mapiraju teren s visokim stepenom tačnosti, identifikujući optimalne rute koje minimiziraju uticaj na ekosistem, izbjegavaju strme padine i osjetljiva područja. Ovaj pristup smanjuje eroziju tla i oštećenja vegetacije, što je ključno za održivo šumarstvo.

Literatura:

Asli, K. H., Naghdi, R., & Nikooy, M. (2015). Estimation of cost and the amount of production in construction of forest road by combining hydraulic excavator and bulldozer (Case study: Liashisera district, Guilan Province).

Caliskan, E. (2013). Environmental impacts of forest road construction on mountainous terrain. Iranian journal of environmental health science & engineering, 10, 1-8.

Chacko, V., Yu, H., Cang, S., & Vladareanu, L. (2014). State of the art in excavators. In Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (pp. 481-488). IEEE.

Hrůza, P. (2003). Optimisation of forest road network under principles of functionally integrated forest management. Journal of forest science, 49(9), 439-443.

Laschi, A., Foderi, C., Fabiano, F., Neri, F., Cambi, M., Mariotti, B., & Marchi, E. (2019). Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 40(1), 207-219.

Marinov, K. (2014). Milling Machines Performances for Soil Preparation on Non-Renewable Forest Sites. ТЕНДЕНЦИИ В ПОЛЗВАНЕТО ОТ ГОРИ–СОБСТВЕНОСТ НА ФИЗИЧЕСКИ ЛИЦА.., 120.

Marinov, K., Kostov, K., & Peev, D. (2023). Operational properties of forestry mulchers for cleaning field protection forest belts after sanitary cuttings. Silva Balcanica, 24(2), 59-81.

Mathur, A., Singh, V. K., Chaudhary, V., Mishra, P. K., Akram, M., Ali, K., ... & Roshan, V. K. (2024). A Comprehensive Review of Bulldozers in Modern Construction. Journal of Scientific Research and Reports, 30(5), 337-342.

Otsuki, T., Morikawa, H., Shiiba, Y., Ogata, S., & Moteki, M. (2020). Research on standardization of construction site time-series change information as learning data for automatic generation of work plan of construction machinery in earthworks. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 37, pp. 1053-1060). IAARC Publications.

Ozturk, T., Inan, M., & Akgul, M. (2009). Environmental damages of forest road construction by bulldozer on steep terrain. African Journal of Biotechnology, 8(18).

Parsakhoo, A., Hosseini, S. A., Jalilvand, H., & Lotfalian, M. (2008). Physical soil properties and slope treatments effects on hydraulic excavator productivity for forest road construction. Pakistan Journal of Biological Sciences, 11(11), 1422-1428.

Pentti, M. (2023). EARLY GRADERS ON FINNISH ROADS. MAN AND THE MACHINE, 55.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

630*36(075.8)

ГЛОБОЧКИ Лакић, Гордана, 1964-
Mehanizacija u šumarstvu / Gordana Globočki-Lakić, Dane Marčeta. - Banja Luka : Univerzitet u Banjoj Luci : Šumarski fakultet, 2025 (Istočna Ilidža : Print shop). - 343 стр. : илустр. ; 30 cm

Тираж 150. - Библиографија уз свако поглавље.

ISBN 978-99976-49-74-4

COBISS.RS-ID 142447361