

Analiza uzroka kvara zupčanika hidrauličke dizalice za utovar-istovar stupova za električne mreže

Mužević, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:111827>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Mužević

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Filip Mužević

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na svim savjetima, trudu, strpljenju, pristupačnosti i podršci pri izradi ovoga rada.

Zahvaljujem se laborantu Ivanu Vovku pri pomoći oko eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se g. Draženu Mezdiću, bivšem studentu FSB-a, a sada i zaposleniku uspješne tvrtke Hidraulika Kurelja, koja se bavi proizvodnjom i servisiranjem hidrauličkih konstrukcija i opreme. Zahvaljujem se njemu i tvrtki na ustupljenom strojnom dijelu koji je ispitivan u ovome radu, te što su mi vrlo srdačno dopustili da se upoznam čime se bave, koju tehnologiju i strojeve koriste.

Na kraju bih se zahvalio svim prijateljima, kolegama na faksu, obitelji i curi na podršci i razumijevanju tokom studiranja.

Filip Mužević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur. broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Filip Mužević** **JMBAG 0035226421**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza uzroka kvara zupčanika hidrauličke dizalice za utovar-istovar stupova za električne mreže**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Failure analysis of a gear of a hydraulic crane for loading-unloading of poles for electrical networks**

Opis zadatka:

Hidrauličke dizalice predstavljaju jedan od neizbježnih uređaja u brojnim industrijama. Zbog primjene hidrauličkog sustava ove dizalice preciznije, jednostavnije i sigurnije prenose i premještaju teret, otpornije su na trošenje i osiguravaju dugotrajan i siguran rad. Postoje mnogobrojne izvedbe dizalica koje ovise o njihovoj specifičnoj primjeni.

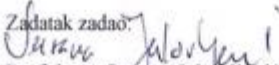
U redu je potrebno napraviti sljedeće:

- 1) opisati namjenu i princip rada dizalice za utovar-istovar stupova za električne mreže
- 2) opisati komponente i princip rada hidrauličkog sustava
- 3) analizirati oštećenja zupčanika
- 4) komentirati rezultate i dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. DIZALICE.....	1
1.1. Fiksne ili nepokretne dizalice	2
1.2. Pokretne dizalice	3
1.3. Utovarno – istovarne hidrauličke dizalice	4
1.4. Nosiva, ovjesna i zahvatna sredstva.....	6
1.4.1. Užad.....	7
1.5. Grabilice.....	10
2. HIDRAULIKA	13
2.1. Hidraulički sustav	14
2.1.1. Princip rada hidrauličkog sustava	15
2.1.2. Hidrauličke/radne tekućine	17
2.1.2.1. Voda.....	18
2.1.2.2. Mineralna ulja	18
2.1.2.3. Teško zapaljive tekućine.....	19
2.1.3. Prednosti i nedostaci hidrauličkog sustava	20
Prednosti hidrauličkog sustava su [12]:	20
2.1.4. Primjena hidrauličkog sustava	21
3. ZUPČANICI.....	22
3.1. Zupčanici s ravnim zubima	24
3.1.1. Klizanje bokova	26
3.1.2. Nosivost zupčanika	27
3.2. Materijali za izradu zupčanika	28
4. OŠTEĆENJA I KVAROVI KOD ZUPČANIKA	30
4.1. Trošenje zupčanika	30
4.2. Nastajanje pitting-a (jamičenje)	30
4.3. Umor materijala	33
4.4. Lom materijala zbog preopterećenja.....	33
4.5. Zaribavanje.....	34
4.6. Korozija.....	35
5. EKSPERIMENTALNI DIO	37
5.1. Analiza i vizualni pregled zupčanika hidrauličke dizalice.....	37
5.2. Koraci ispitivanja	45
5.2.1. Rezanje uzorka.....	45
5.2.2. Priprema uzorka	46

5.2.3. Kemijska analiza	48
5.2.4. Analiza mikrostrukture uzorka.....	48
5.2.5. Mjerenje tvrdoće	50
6. ANALIZA REZULTATA	53
7. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	55

POPIS SLIKA

Slika 1.	Dizalica Leonarda da Vincia [1]	1
Slika 2.	Nepokretna toranjska dizalica [2].....	2
Slika 3.	Teleskopske dizalice [3].....	3
Slika 4.	Primjeri pokretnih dizalica [4]	3
Slika 5.	Dijelovi utovarno – istovarne hidrauličke dizalice [5].....	4
Slika 6.	Maksimalne težine dizanja na svakom teleskopu u izvučenom položaju [6].....	5
Slika 7.	Utovarno – istovarna hidraulička dizalica na kamionu Zagrebačkog Holdinga	5
Slika 8.	Kuka za utovar i istovar određenog materijala.....	6
Slika 9.	Nosiva, ovjesna i zahvatna sredstva [1]	7
Slika 10.	Uže s koloturnicima [1].....	8
Slika 11.	a) Spiralna užad, b) pramena užad [1].....	9
Slika 12.	Užetne veze [1].....	10
Slika 13.	Princip rada jednoužetne grabilice [1].....	11
Slika 14.	Princip rada i izgled višeužetne grabilice [1]	11
Slika 15.	Polipne grabilice [1]	12
Slika 16.	Arhimedov vijak [8]	13
Slika 17.	Način rada hidrauličke preše [10]	14
Slika 18.	Shema hidrauličkog sustava [11]	15
Slika 19.	Pojednostavljeni rad hidrauličkog sustava [12].....	17
Slika 20.	Princip rada zupčanika [14].....	22
Slika 21.	Zupčani par reduktora i multiplikatora [14]	23
Slika 22.	Zahvat cikloidnih bokova [15]	24
Slika 23.	Zahvat evolventnih bokova [15].....	25
Slika 24.	Kut zahvata α [15]	25
Slika 25.	Utjecaj kuta zahvatne linije na oblik zuba [13].....	25
Slika 26.	Smjer gibanja točaka dodira bokova i smjer sila trenja na bokovima pogonskog i gonjenog zupčanika [15]	27
Slika 27.	Mehaničko opterećenje zuba [15]	28
Slika 28.	Trošenje bokova [15].....	30
Slika 29.	Nastajanje rupičenja (pittinga) na podnožju pogonskog zupčanika [15]	31
Slika 30.	Nastajanje rupičenja (pittinga) [15].....	31
Slika 31.	Razni oblici trošenja izazvani klizanjem bokova [15]	32
Slika 32.	Lom uslijed umora materijala [15].....	33
Slika 33.	Lom uslijed preopterećenja materijala [15].....	34
Slika 34.	Lom na mjestu završetka zakaljene zone [15].....	34
Slika 35.	Početak zaribavanja (lako zaribavanje) [15]	35
Slika 36.	Tribokorozija [15]	36
Slika 37.	a) Hidraulička dizalica, b) detalj A (stup dizalice).....	37
Slika 38.	a) Zupčasta letva, b) analizirani zupčanik [18]	38
Slika 39.	Prikaz gibanja zupčaste letve i zupčanika [18]	38
Slika 40.	Analizirani zupčanik prije čišćenja i odmašćivanja	39
Slika 41.	Detalj A: odlomljeni zubi zupčanika	40
Slika 42.	Ultrazvučni čistač i sredstvo za čišćenje	40
Slika 43.	Označeni zubi zupčanika	41
Slika 44.	Tragovi trošenja na zubima zupčanika (zubi broj 11, 12, 13, 14).....	42
Slika 45.	Odlomljeni zubi zupčanika (zubi broj 13, 14).....	43
Slika 46.	Piting na zubu 7	43
Slika 47.	Piting na zubima 4, 5, 6.....	44

Slika 48.	Rupice uzrokovane piting-om na zubu 8 i 9.....	44
Slika 49.	Odrezani zupčanik i dijelovi njegove osovine	45
Slika 50.	Mecatome T260.....	46
Slika 51.	Uređaj za poliranje Mecatech 250.....	47
Slika 52.	Ispitni uzorak zupčanika.....	47
Slika 53.	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	49
Slika 54.	Mikrostruktura jezgre zuba, povećanje 200x	49
Slika 55.	Mikrostruktura ruba zuba, povećanje 200x.....	50
Slika 56.	Prikaz ispitivanja tvrdoće po Vickersu [20]	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Koraci ispitivanja	45
Tablica 2. Kemijski sastav zupčanika	48
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće zupčanika (HV1).....	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	N/m^2	Tlak
ρ	kg/m^3	Gustoća
v	m/s	Brzina gibanja tekućine
h	mm	Visina
i	-	Prijenosni omjer
ω_A	rad/s	Kutna brzina pogonskog zupčanika
ω_B	rad/s	Kutna brzina gonjenog zupčanika
Z_A	-	Broj zubi pogonskog zupčanika
Z_B	-	Broj zubi gonjenog zupčanika
α	$^\circ$	Zahvatni kut
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
F	N	Sila utiskivanja
A	mm^2	Površina utisnuta indenterom
d	mm	Duljina dijagonale

SAŽETAK

Hidrauličke dizalice koriste hidrauličke sustave za prijenos velikih snaga. Cijeli sustav omogućava sigurnost, veću pouzdanost i upravljivost te dugi vijek trajanja pojedinih strojnih elemenata. U ovome radu opisane su vrste i primjena dizalica te njezini dijelovi. Osim toga, opisane su funkcije hidrauličkog sustava kao i njegove komponente, detaljno je opisan rad zupčanika, materijali koji su pogodni za izradu zupčanika te najčešći kvarovi zupčanika.. U eksperimentalnom dijelu rada analiziran je zupčanik koji se nalazi na glavnom stupu hidrauličke dizalice te je u vrlo kratkom vremenskom periodu postao neupotrebljiv i nesiguran za rad. Kako bi se utvrdili razlozi prekomjernog trošenja zupčanika analizirana je mikrostruktura, kemijski sastav te je izmjerena tvrdoća.

Ključne riječi: hidraulički sustav, zupčanik, hidrauličke dizalice, trošenje

SUMMARY

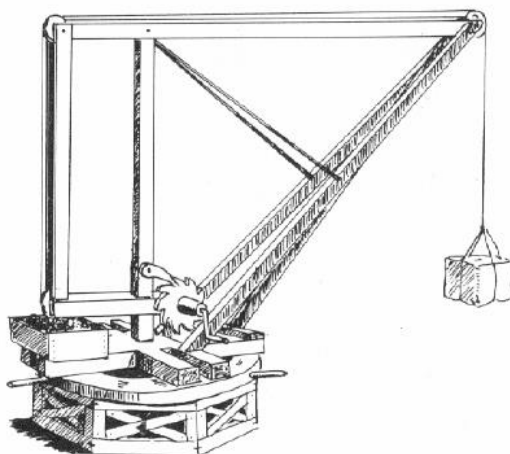
Hydraulic cranes use hydraulic systems to transmit high power. The entire system ensures safety, greater reliability and maneuverability, as well as a long service life of individual machine components. This paper describes the types and applications of cranes and their parts. In addition, the functions of the hydraulic system as well as its components are described, the operation of gears, the materials that are suitable for manufacturing gears and the most common failures of gears are described in detail. In the experimental part of the paper, the gear located on the main column of the hydraulic crane was analyzed and in a very short period of time became unusable and unsafe for work. In order to determine the reasons for excessive gear wear, its microstructure and chemical composition were analyzed and its hardness was measured.

Key words: hydraulic system, gear, hydraulic cranes, wear

1. DIZALICE

Dizalice su neizostavni dio današnjih gradilišta jer služe za podizanje, spuštanje ili prijenos teških predmeta. Dizalice se najviše primjenjuju u građevinarstvu, a svi mostovi, neboderi, zgrade, vijadukti, stupovi, kulturne znamenitosti i slično nastali su upotrebom nekakve vrste dizalica.

Povijesno gledajući, prve primjene principa dizalice su iz vremena oko 2600 g. pr. Kr. Prvi koji je postavio temelj za konstrukcijsku izvedbu i funkcioniranje današnjih dizalica bio je Leonardo da Vinci. Njegov izum sastojao se od okretne platforme, ručice koja je služila za dizanje i spuštanje tereta te zadržac koji služi da spriječi teret od padanja (slika 1) [1].



Slika 1. Dizalica Leonarda da Vincia [1]

Dizalice se mogu podijeliti u dvije velike skupine [1]:

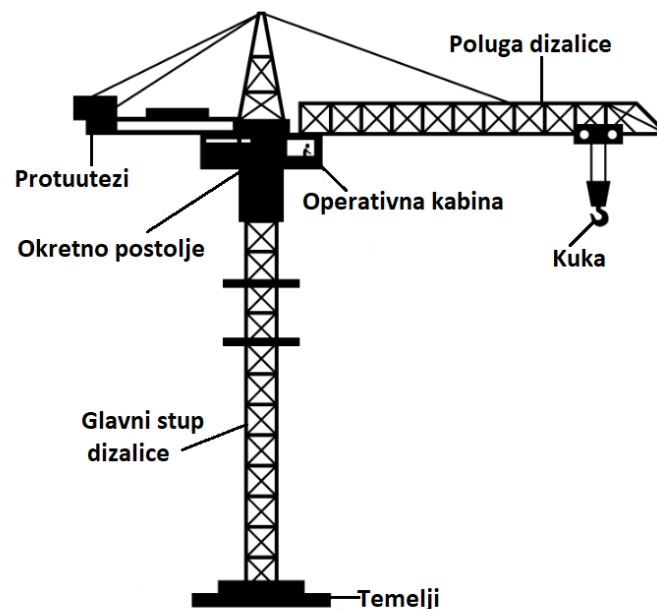
1. Fiksne ili nepokretne dizalice
2. Mobilne ili pokretne dizalice.

Svaka od navedenih dizalica ima određenu zadaću koju mora ispuniti, stoga je pravilan odabir dizalice za određeni projekt ključan kako ne bi došlo do kašnjenja ili ugrožavanja sigurnosti ljudi na gradilištu, ali i van njega.

1.1. Fiksne ili nepokretne dizalice

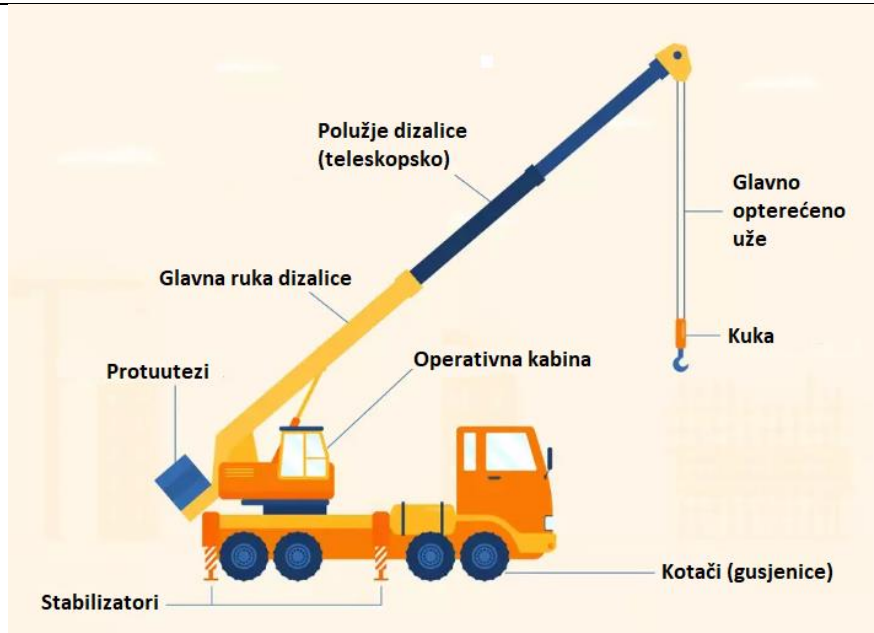
Fiksne dizalice konstruirane su da budu učvršćene na zadanoj poziciji što im omogućava podizanje većih masa na veće visine od pokretnih dizalica. Nedostatak ovakve konstrukcije dizalica je nemogućnost izmještanja. Najpoznatije vrste ovakvih dizalica su toranjske, teleskopske, mosne.

Toranjske dizalice se najviše koriste kod izgradnje visokih zgrada i objekata. Opremljene su operativnom kabinom, okretnim postoljem, pomičnim krakom, protutezima za ravnotežu dizalice, kukom i vitlom, stabilizatorima zbog veće sigurnosti pri prenošenju velikih masa (slika 2) [1].



Slika 2. Nepokretna toranjska dizalica [2]

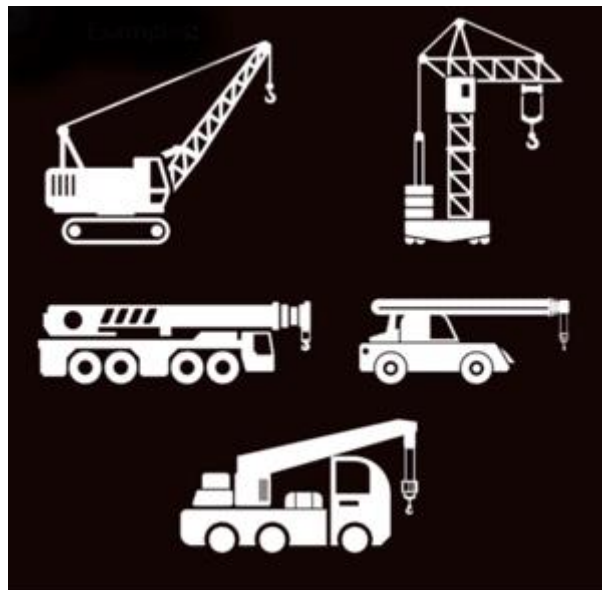
Teleskopske dizalice najčešće se montiraju na kamione i zbog toga su prilagodljive za razne situacije. Najveća prednost ovakvih dizalica je polužje dizalice (teleskopsko) koje ima mogućnost uvlačenja i izvlačenja poput teleskopa, što omogućava promjenu duljine. Teleskopske dizalice u fiksne, ali zbog kretanja vozila smatraju se i pokretnim (slika 3) [1].



Slika 3. Teleskopske dizalice [3]

1.2. Pokretne dizalice

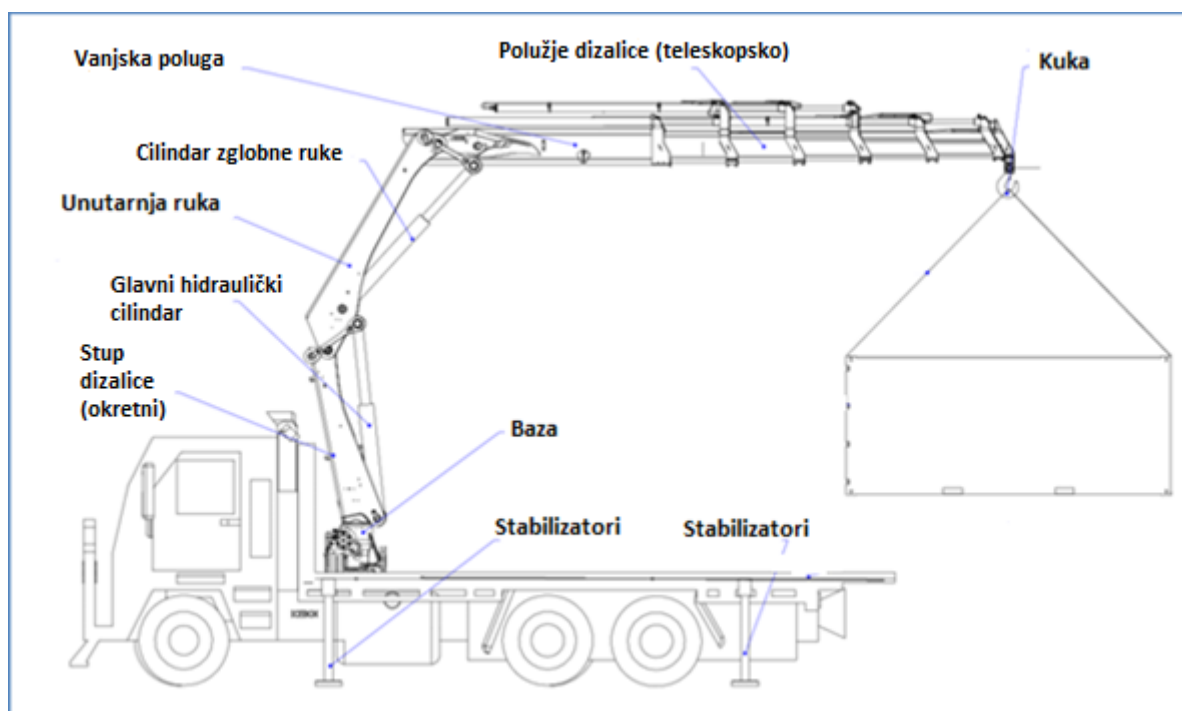
Konstrukcija pokretne dizalice omogućava njihovo kretanje po gradilištima, te brzo i jednostavno prenašanje tereta. Dizalice se najčešće sastoje od jedne ruke s teleskopskim polužjem za podizanje tereta. Smještene su na kamionima koji za kretanje koriste kotače ili gusjenice, što ih čini povoljnima za kretanje po teško dostupnim terenima (slika 4) [1].



Slika 4. Primjeri pokretnih dizalica [4]

1.3. Utovarno – istovarne hidrauličke dizalice

Zupčanik koji je analiziran u ovome radu nalazio se na utovarno – istovarnoj hidrauličkoj dizalici koja je montirana na kamione HEP-a i Zagrebačkog holdinga. Ovakva hidraulička dizalica primarno se koristi za utovar i istovar električnih stupova, ali i ostalih materijala poput zemlje, trave i slično. Dijelovi utovarno – istovarne hidrauličke dizalice prikazani su na slici 5.



Slika 5. Dijelovi utovarno – istovarne hidrauličke dizalice [5]

Analizirani zupčanik i njegov sustav namijenjeni su za rotacijsko gibanje utovarno-istovarne hidrauličke dizalice. U slučaju nepravilnog korištenja okretne i vanjske ruke hidrauličke dizalice može doći do preopterećenja strojnih dijelova koji mogu dovesti do kvara ili havarije stoga se je potrebno držati propisanih uputa i opterećenja za zadane krakove ruka (slika 6).

Uljni hidraulički pogoni koriste se zbog jednostavnog upravljanja te dobre i kontinuirane regulacije. Klip i cilindar omogućavaju ostvarivanje velike pogonske sile na relativno malom kratkom hod.

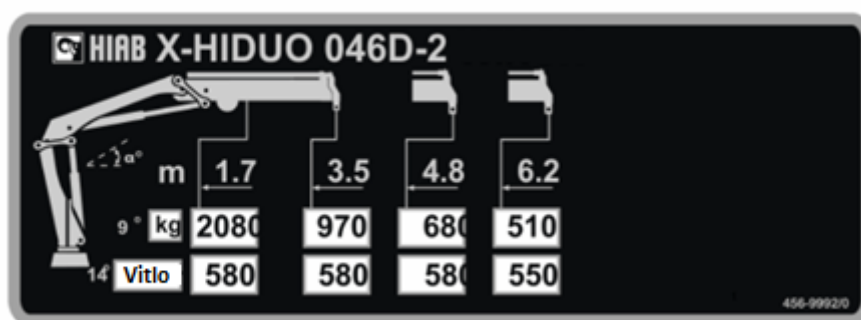


Diagram showing the maximum lifting capacities (in kg) for the HIAB X-HIDUO 046D-2 crane at various heights (in m) and configurations. The crane is shown in its extended position.

Height (m)	Capacity (kg)	Capacity (kg)	Capacity (kg)	Capacity (kg)
1.7	2080	970	680	510
3.5	580	580	580	550
4.8				
6.2				

Additional information: 9° kg, 14 Vitlo, 456-9992/0

Slika 6. Maksimalne težine dizanja na svakom teleskopu u izvučenom položaju [6]

Na slikama 7 i 8 prikazana je ugrađena utovarno – istovarna dizalica X-HIDUO 046 na kamionu Zagrebačkog Holdinga.



Slika 7. Utovarno – istovarna hidraulička dizalica na kamionu Zagrebačkog Holdinga



Slika 8. Kuka za utovar i istovar određenog materijala

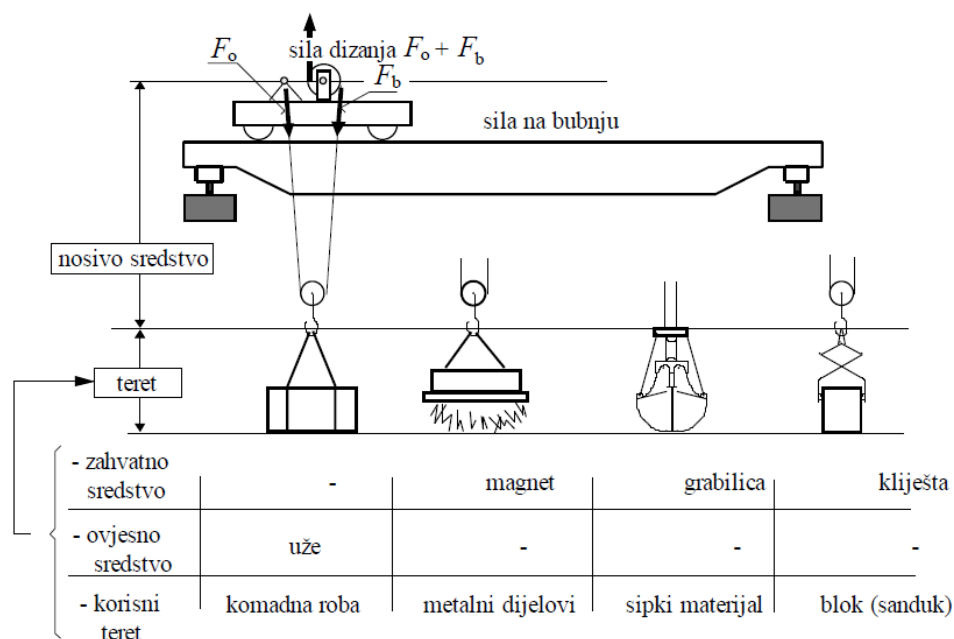
1.4. Nosiva, ovjesna i zahvatna sredstva

Dizalice su složeni transportni uređaji koji se sastoje od više dijelova, a glavna funkcija im je dizanje, spuštanje i prenošenje tereta [1].

Elementi koji su ugrađeni na vanjsku polugu dizalica podijeljeni su na:

- 1) nosiva sredstva – razni lanci, užad, kuke i koloturnici (služe da dizanje tereta, a povezani su mehanizmom za dizanje)
- 2) zahvatna sredstva – grabilice, magneti, zahvatna kliješta i posude (služe za zahvaćanje materijala, lako se ugrađuju i skidaju s nosivog sredstva)
- 3) ovjesna sredstva – ovjesna užad i lanci, ovjesne trake (služe za vješanje tereta ili zahvatnog sredstva na nosivo sredstvo (kuku)).

Dijelovi nosivih, ovjesnih i zahvatnih sredstva prikazani su na slici 9 [1].



Slika 9. Nosiva, ovjesna i zahvatna sredstva [1]

1.4.1. Užad

Uže je jedno od glavnih elemenata dizalice koje je potrebno za dizanje/spuštanje tereta, a zbog sigurnosti i pravilnog funkcioniranja užadi propisuju se posebni zahtjevi poput vrste materijala užadi, njihove čvrstoće, trajnosti i područja primjene. Na temelju prethodnih zahtjeva razlikuju se vlaknasta i žičana užad.

Vlaknasta užad

Vlaknasta užad osigurava veliku pokretljivost i lakoću pri rukovanju, ali zbog svoje male trajnosti i čvrstoće koristi se samo kod ručnih dizalica male nosivosti u kombinaciji s koloturnicima (slika 10).

Materijali za izradu vlaknastih užadi su prirodna vlakna poput konoplje i sisala te je moguće izrada od sintetičkih vlakana poput poliamida (PA), poliestera (PES) i polipropilena (PP) [1].



Slika 10. Uže s koloturnicima [1]

Žičana užad

Žičana užad ima daleko veću primjenu od vlaknastih, stoga postoje razne vrste i područja primjene. Pogonska užad je opterećena vlačno i na savijanje jer se pri gibanju na bubnju savijaju. Dimenzioniraju se na vlačno opterećenje, a promjer bubnja oko kojeg se savijaju ovisi o promjeru i broju pregiba užeta. Njihova najčešća primjena je kod mehanizama za dizanje ili spuštanje liftova, žičara i slično [1].

Nosiva užad je opterećena na vlak, savijanje, ali i poprečnim silama, stoga je kod njihovog dimenzioniranja potrebno uzeti u obzir vlačna opterećenja, ali i veličine poprečne sile. Upravo zbog veće nosivosti, nosiva užad služi da se po njima gibaju kabine žičara, kotači vitla i slično.

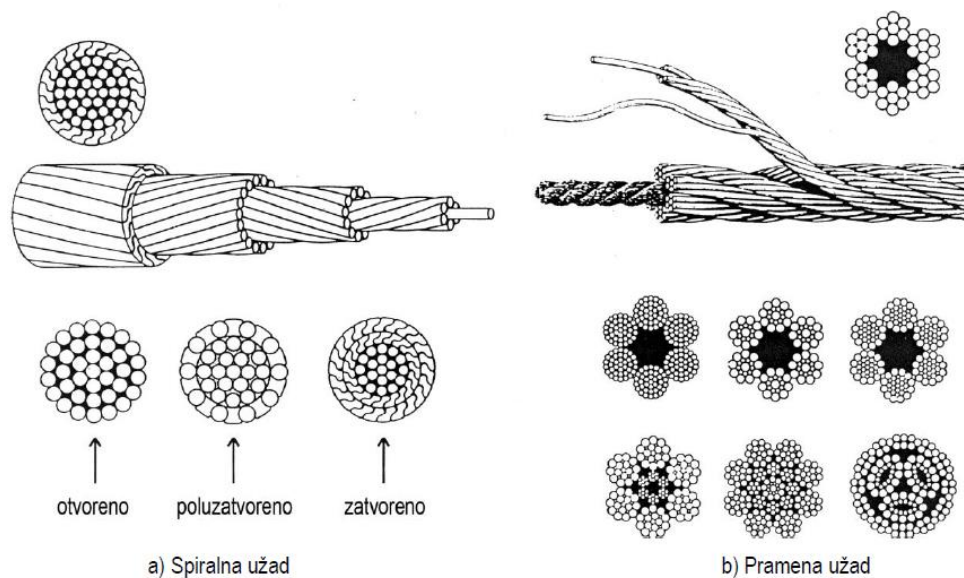
Zbog sigurnosti, užad je potrebno promijeniti nakon definiranog vijeka trajanja jer se na njima javljaju statička i dinamička opterećenja koja nisu uobičajena kao kod drugih strojnih dijelova.

Žičana užad najčešće se izrađuje od nelegiranog ugljičnog čelika sa sadržajem ugljika od 0,5 do 0,9 % C [1].

Žičana užad dijeli se prema građi i načinu pletenja na [1]:

- spiralnu užad (nosiva)
- pramenu užad (pogonska).

Slika 11 prikazuje razlike u građi danim presjecima.



Slika 11. a) Spiralna užad, b) pramena užad [1]

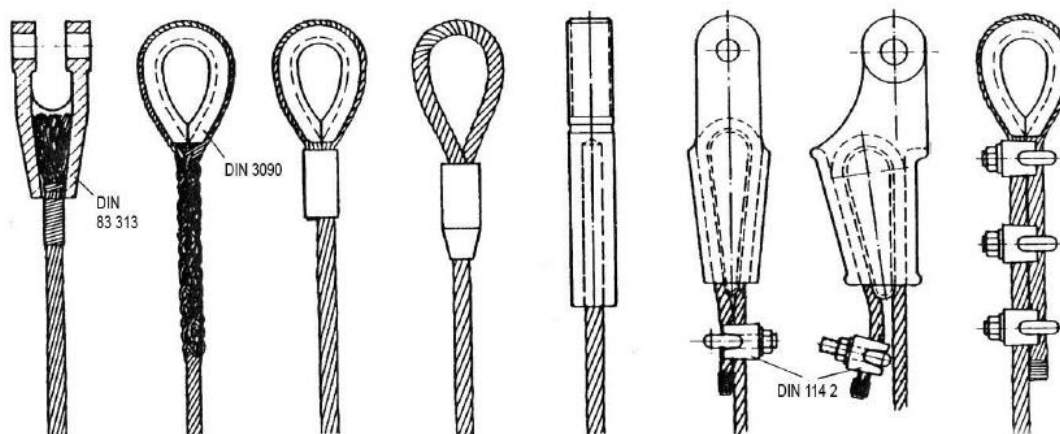
Razlika između spiralnih i pramenih užadi je što su kod spiralnih jedan ili više slojeva žice omotani u suprotnim smjerovima oko jedne žice koja čini jezgru, dok se kod pramenih jedan ili više pramena omotavaju oko pramene jezgre.

Kod izrade užadi potrebno je paziti na sljedeće čimbenike koji utječu na trajnost [1]:

- vlačno opterećenje užeta
- savijanje užeta
- broj pregiba
- debljina žice
- utjecaj podmazivanja
- utjecaj korozije.

Užetne veze služe za pričvršćivanje krajeva užeta na bubnjeve, kuke, svornjake, oslonce nosivih konstrukcija i za međusobno spajanje užeta (slika 12). Najčešće užetne veze su [1]:

- zalijevanje kraja užeta u koničnu glavinu
- upletanje
- čahura za uprešanje
- vijčana spojnica
- klin.



Slika 12. Užetne veze [1]

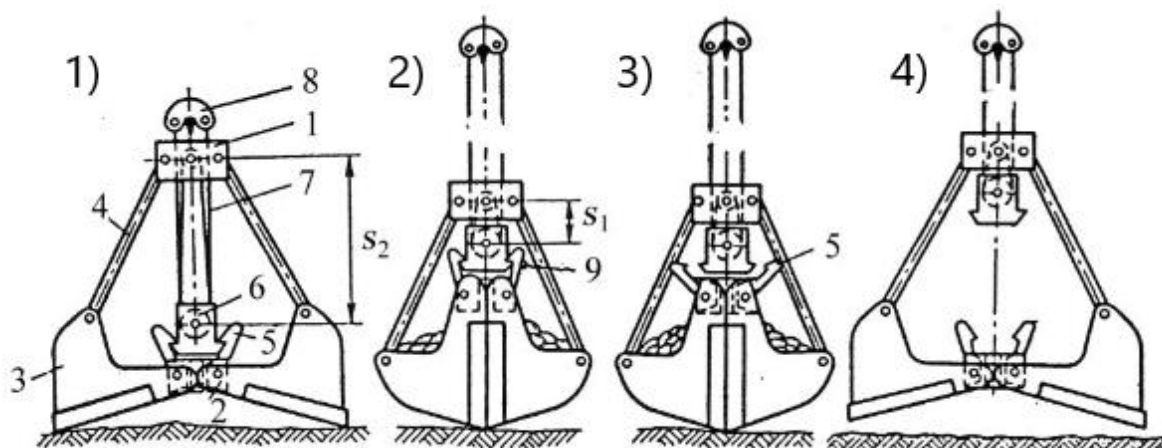
1.5. Grabilice

Grabilice su zahvatna sredstava, a njihova funkcija je zahvaćanje tereta i na taj način olakšavaju i ubrzavaju njegov prijenos. Podjela grabilica prema pogonu mehanizma je na užetnu i motornu. Grabilice se već duže vrijeme koriste za prijenos sipkog materijala poput žita, ugljena, pijeska, kamena i slično i zbog toga se radi na unapređenju oblika grabilica kako bi se povećala efektivnosti grabljenja.

Grabilice su podijeljene na [1]:

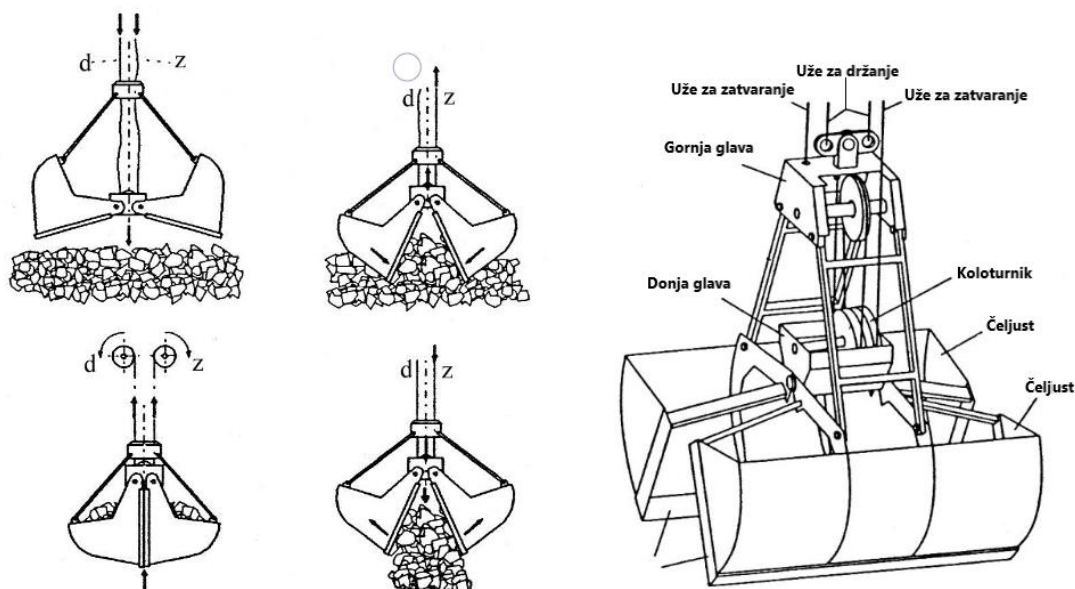
- jednoužetne polužne grabilice
- višeužetne polužne grabilice
- polipne grabilice
- trim grabilice
- škaraste grabilice.

Jednoužetne grabilice funkcioniraju tako da putuju otvorene prema materijalu kojeg treba zahvatiti. Princip rada jednoužetne grabilice prikazan je na slici 13 [1]. Kada grabilica dođe iznad materijala, spušta se blok 6 prema dolje koji prijeđe put s_2 te se hvataljkom 5 ostvaruje spajanje bloka 6 i donje glave 2. Podizanjem glave 8 i užeta 7 dolazi do zatvaranja grabilice, koja je puna materijalom i nastavlja put prema gore. Nakon dolaska na predviđeno mjesto ispuštanja, diže se blok 8 i time se omogućava otvaranje i pražnjenje grabilice.



Slika 13. Princip rada jednužetne grabilice [1]

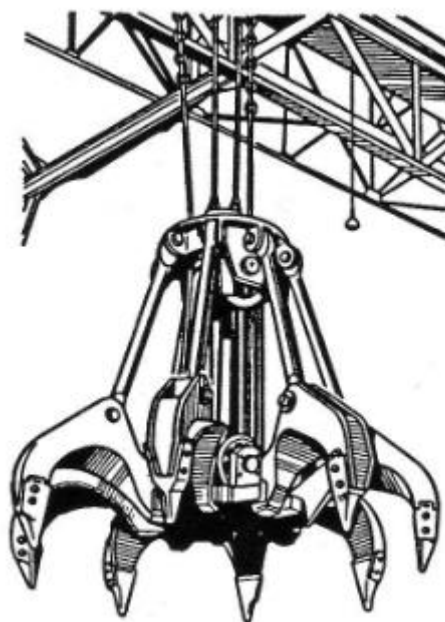
Glavni problem ovih grabilica je dugo vrijeme radnog ciklusa čime se smanjuje kapacitet materijala kojeg je moguće prenijeti te se zbog toga koriste višeužetne grabilice kako bi se povećao kapacitet, a njihov princip rada i izgled prikazani su na slici 14.



Slika 14. Princip rada i izgled višeužetne grabilice [1]

Polipne grabilice (slika 15) nalaze se na analiziranoj hidrauličkoj dizalici, samo što nisu povezane preko užeta već motora, čime spadaju u skupinu motornih grabilica (elektrohidrauličke). Motorne grabilice imaju pogonski agregat koji ulje pod pritiskom dovodi do radnih cilindara. Njihova najčešća primjena je za grabljenje krutog materijala i otpadne robe,

zbog toga se koriste za prikupljanje smeća, lišća i sličnih materijala. Glavna primjena polipnih grabilica je to da služe za izvlačenje stupova, ograda i ostalog iz zemlje ili betona zbog čega se često ugrađuju na transportna vozila poput kamiona i traktora [1].

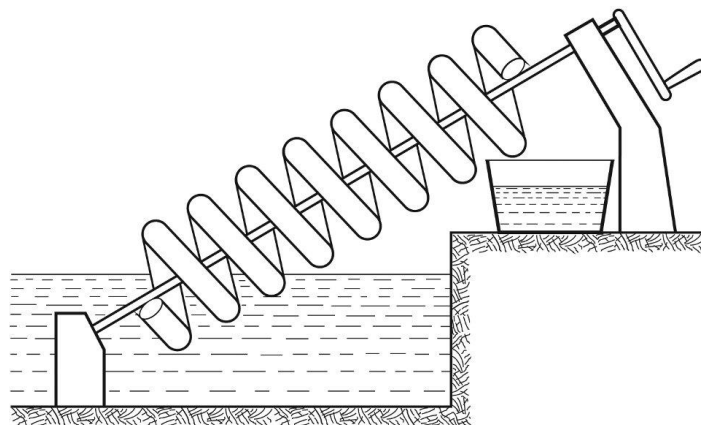


Slika 15. Polipne grabilice [1]

2. HIDRAULIKA

Hidraulika (grčki *hýdōr* = voda i *eulos* = cijev) je grana znanosti koja se bavi praktičnom primjenom tekućina. Tekućine mogu biti u stanju mirovanja ili gibanja. Hidromehanika je mehanika tekućine koja dolazi od grčke riječi *hýdōr* = voda i *mechanè* = stroj, a dijeli se na hidrostatičku (grčki *hýdōr* = voda i *statós* = stojeći) i hidrodinamiku (grčki *hýdōr* = voda i *dýnamis* = sila).

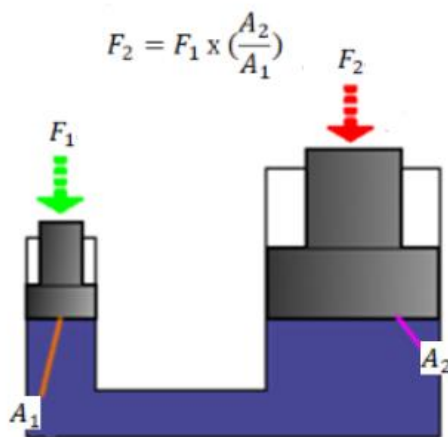
Hidrostatika je znanost o ravnoteži tekućina, dok je hidrodinamika znanost o gibanju tekućina. Povijesno gledajući, prva načela hidraulike shvaćena su i korištena prije par tisuća godina u drevnim zemljama poput Egipta i Mezopotamije. Jedan od prvih začetnika hidraulike je grčki matematičar i mislioc Arhimed (3. st. pr. Kr.), a zaslužan je za otkriće principa uzgona. Jedan od izuma je i takozvani Arhimedov vijak, koji danas ima veliku primjenu u raznim suvremenim postrojenjima i strojevima. Arhimedov vijak izveden je u obliku svinute cijevi, a služi kao pumpa za vodu (slika 16). Pri okretanju cijevi voda se polako diže sve dok ne dođe do kraja cijevi gdje iscuri van. Prije je ovakav mehanizam bio korišten na natapanje polja, a danas se pretežito koristi kao dio transportnog sustava [7].



Slika 16. Arhimedov vijak [8]

Sva današnja moderna tehnologija vezana za hidrauliku temelji se na zakonima koje su formirali francuski znanstvenik Blaise Pascal i švicarski fizičar Daniel Bernoulli. Pascalov zakon temelj je hidrostatičke te govori kako se tlak u tekućini prenosi jednako u svim smjerovima. Blaise Pascal zaslužan je za izum prve hidrauličke preše, koja se sastoji od posude koja ima dva otvora različite površine, cijev koja ih povezuje i klipove koji se mogu pomicati, a smješteni su na otvorima. Posuda je ispunjena tekućinom, a površina jednog klipa je n puta

veća od drugoga, te djelovanjem određenom silom na manji klip u manjem cilindru prenosi se sila kroz cijev na veliki klip u velikom cilindru koja je n puta veća (hidraulička preša koristi se za povećavanje sile) (slika 17) [9].



Slika 17. Način rada hidrauličke preše [10]

Bernoullijeva jednadžba smatra se osnovnim izrazom u hidromehanici, a govori o tome da za vrijeme stacionarnog strujanja tekućine masa tekućine je konstantna tj. ima konstantnu energiju duž cijele cijevi. Bernoullijeva jednadžba povezuje tlak p , gustoću ρ , brzinu gibanja tekućine v i visinu/položaj h ovisan o položaju u prostoru i sve to u cijevi bez gubitaka strujanja.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + p = konst. \quad (1)$$

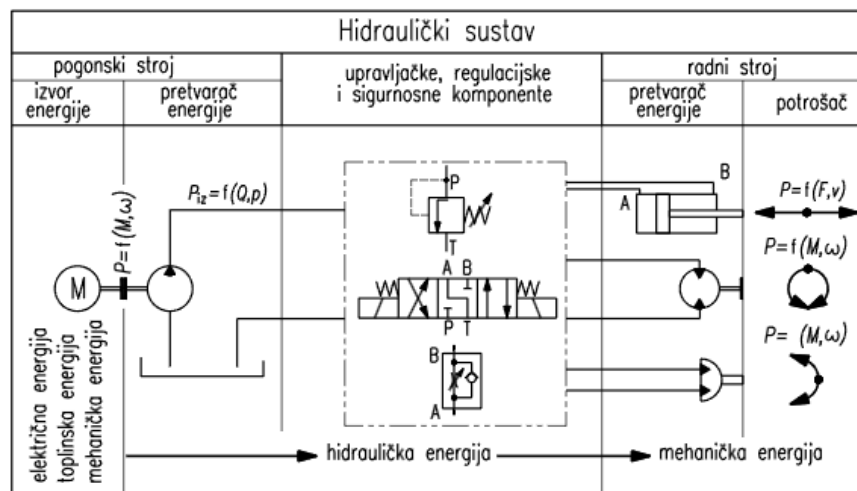
Iz jednadžbe (1) može se zaključiti da se povećavanjem brzine tekućine tlak smanjuje, a smanjenjem brzine tekućine tlak se povećava.

2.1. Hidraulički sustav

Hidraulički sustav primjenjuje se za prijenos energije pomoću radne komprimirane tekućine s jednog mjesta na drugo. Hidraulički sustavi nalaze se unutar raznih uređaja koji pretvaraju jedan oblik energije u drugi, ali mogu imati i druge zadatke poput regulacije tlaka, protoka, promjene smjera radne tekućine. Svaki hidraulički sustav sastoji tri glavna dijela i prikazani su na slici 18 [11]:

- 1) pogonski stroj: pretvara električnu, mehaničku ili toplinsku energiju u hidrauličnu energiju

- 2) upravljačke – regulacijske – sigurnosne komponente
- 3) radni – izvršni organi koji pretvaraju hidrauličnu energiju u mehaničku energiju.



Slika 18. Shema hidrauličkog sustava [11]

Osnovni dijelovi hidrauličkog sustava su sljedeći [11]:

- hidraulička tekućina
- motor
- klipovi
- cilindri
- filteri
- ventili
- pumpa
- spremnik
- cjevovod
- akumulator.

2.1.1. Princip rada hidrauličkog sustava

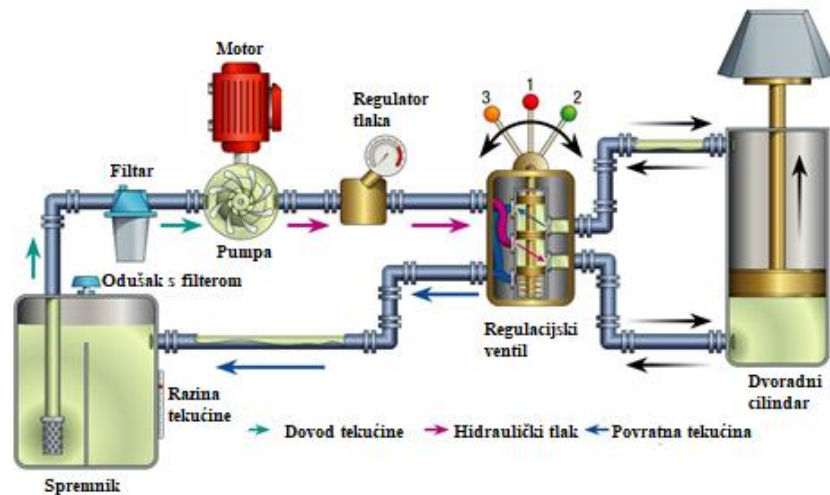
Spremnik radne tekućine služi da osigura dovoljnu količinu radne tekućine do svakog elementa hidrauličkog sustava te se u njemu odvajaju krute čestice/nečistoće unutar radne tekućine koje se onda talože na dnu spremnika.

Cjevovod hidrauličkog sustava čine krute i savitljive cijevi koje služe da bi se radna tekućina koja prenosi energiju mogla prenositi unutar hidrauličkog sustava. Savitljive cijevi koriste se na mjestima gdje je teško izvesti čvrste spojeve, ali i na spojevima koji se često skidaju/premještaju te teže pristupačnim mjestima. Savitljive cijevi proizvode se od gume (elastomera). Pri izboru cijevi treba paziti na nazivni tlak, temperaturu rada te vrstu hidrauličke tekućine.

Motor je izvor napajanja za pumpu. Mehanička energija, koja se dobije iz električne energije elektromotora ili toplinska energija, koja se dobije iz motora s unutarnjim izgaranjem dovodi se do rotora pumpe, gdje se pretvara u hidrauličnu energiju. Nakon toga radna tekućina prenosi energiju kroz cjevovod do hidrauličnog motora koji ju ponovo pretvara u mehaničku energiju i predaje radnom stroju. Radni stroj sastoji se od hidrauličkog cilindra koji se sastoji od cilindrične cijevi i klipa. Kada se hidraulički tlak primjeni na jedno čelo klipa u dvoradnom cilindru, klip se pomiče prema gore, a pritom stvara silu ili linearno gibanje. Radna tekućina na suprotnoj strani klipa vraća se u pumpu ili spremnik čime se onemogućava rasipanje/gubitci tekućine. Odvedena radna tekućina služi za podmazivanje elemenata hidrauličkog sustava. Vrlo mali hidraulički cilindar može stvoriti veliku količinu sile. Primjena ovakvih cilindara je pretežito za podizanje teških tereta.

Ventili hidrauličkog sustava služe za regulaciju protoka i tlaka hidrauličke tekućine.

Upravljačkim sustavom regulira se rad ventila, pumpi i radnog stroja te se postiže precizna kontrola protoka, tlaka i smjera kretanja radne tekućine, a upravljanje može biti ručno ili automatizirano [11]. Na slici 19 prikazan je pojednostavljeni rad hidrauličkog sustava [11].



Slika 19. Pojednostavljeni rad hidrauličkog sustava [12]

2.1.2. Hidrauličke/radne tekućine

Svaka tekućina koja zadovoljava Pascalov zakon može se koristiti u hidrauličkim sustavima.

Za pravilan, dugovječan i siguran rad, radne tekućine imaju zadatak da [11]:

- omogućće prijenos snage
- podmazuju elemente sustava
- odvede toplinsku energiju nastalu u radu sustava
- spriječe koroziju metanih dijelova sustava
- odvede produkte trošenja na njihovo mjesto odvajanja.

Kako bi se ostvarili prethodno navedeni zadatci, tekućine moraju ispuniti sljedeće uvjete [11]:

- dobra sposobnost podmazivanja
- zanemariva stlačivost
- visoka gustoća
- mala sklonost oksidaciji
- postojanost viskoznosti pri promjenama temperature
- nezapaljivost
- netoksičnost
- dobra toplinska vodljivost

- postojanost karakteristika tijekom duljeg vremena (starenje)
- niska cijena i troškovi održavanja.

Ne postoji idealna tekućina koja bi zadovoljila sve navedene uvjete, stoga postoje razne vrste tekućina ovisno o području primjene, a to su [11]:

- voda i spojevi vode
- mineralna ulja dobivena frakcijskom destilacijom iz nafte
- teško zapaljive ili negorive tekućine na bazi emulzije vode i mineralnog ulja (sintetičke tekućine)
- biorazgradive tekućine
- tekući metali i njihove legure.

2.1.2.1. Voda

Voda je najjeftinija hidraulička tekućina, ali to ju ne čini i najboljom. Naime, voda ima dosta nedostataka poput toga da je temperatura smrzavanja 0 °C, a temperatura isparavanja 100 °C, ne podmazuje radne elemente hidrauličkog sustava, ima slabu korozivnu postojanost, ima malu viskoznost i otežava brtvljenje. Prednosti vode su nezapaljivost, niska cijena te dobar prijenos topline.

Kako bi se poboljšala maziva svojstva, zaštita od korozije te povećala viskoznost, čest je slučaj da se koriste emulzije ulja u vodi. Time se dobije čista voda s 2 do 5 % ulja (volumno), čime su poboljšana svojstva čiste vode, ali ne na razini mineralnih ulja (kada bi se to postiglo, govorilo bi se o idealnoj hidrauličkoj tekućini) [11].

2.1.2.2. Mineralna ulja

Mineralna ulja imaju najveću primjenu u hidrauličkim sustavima. Mogu se razlikovati po vrsti osnovnog ulja, stupnju rafiniranosti te količini i vrsti dodatnih aditiva. Potrebno je rafiniranje nafte kako bi se uklonili štetni sumporni spojevi. Mineralna ulja označavaju se s prvim slovom H, a dodatna slova predstavljaju razne aditive koji se dodaju kako bi se poboljšala određena svojstva. Tako se mineralna ulja dijele na [11]:

- tip H: čisto mineralno ulje bez aditiva ograničene primjene
- tip HH: nehibirano rafinirano mineralno ulje
- tip HL: rafinirano mineralno ulje s dodatkom aditiva protiv oksidacije i za zaštitu od korozije

- tip HM: ista svojstva kao HL samo s poboljšanim svojstvima protiv trošenja
- tip HV: ista svojstva kao HM samo s poboljšanim indeksom viskoznosti
- tip HG: ista svojstva kao HM, ali s dodatkom aditiva za smanjenje trenja.

Kada se biraju mineralna ulja, treba paziti na osnovne karakteristike [11]:

- viskoznost:
 - 1) previsoka viskoznost dovodi do velikih otpora kretanju ulja, što znači gubitke, te također pojava kavitacije
 - 2) niska viskoznost dovodi do curenja ulja pokraj brtvi, teška održivost povišenog tlaka, te povećanje trošenja i zagrijavanja ulja
 - 3) za rad s višim tlakovima potrebno je odabrati ulje višeg viskoziteta
 - 4) minimalna radna temperatura sustava trebala bi biti 8 °C veća od točke tečenja ulja (najniža temperatura pri kojoj ulje još uvijek teče)
- stlačivost (promjena volumena pod utjecajem tlaka): ulja koja ne sadrže zrak ostvaruju minimalnu stlačivost koja se često zanemaruje, no ulja koja sadrže neke plinove mogu izazvati smetnje pri većim tlakovima
- otpornost prema miješanju s vodom
- otapanje plinova u tekućini
- stvaranje pjene
- sposobnost demulgacije
- mazivost
- zaštita od korozije
- stabilnost na staranje (oksidaciju).

2.1.2.3. Teško zapaljive tekućine

Kako bi se smanjila požarna opasnost kod hidrauličkih sustava koji rade pri visokim temperaturama, pokraj otvorenog plamena i drugih izvora požara, koriste se teško zapaljive hidrauličke tekućine. Požarna opasnost ovih tekućina temelji se na prisutnosti vode ili kemijskim sastavom. Voda pri isparavanju oduzima toplinu i vodena para sprječava dotok kisika u područje gorenja. Ova skupina radnih tekućina dijeli se na [11]:

- tipa HFA : emulzija vode u ulju kod koje je udjel zapaljive frakcije < 20% namijenjena za uporabu kod radnih temperatura od +5 do 50 °C
- tip HFB: emulzija vode u ulju kod koja ima < 40% vode, ima ograničenu primjenu jer ne ispunjava protupožarne kriterije koji se traže od ove vrste radne tekućine
- tip HFC: otopina polimera u vodi sa sadržajem vode 35...50%. Viskozna karakteristika ovih tekućina je povoljnija nego kod mineralnog ulja, jer se viskoznost manje mijenja promjenom temperature.

2.1.3. Prednosti i nedostaci hidrauličkog sustava

Prednosti hidrauličkog sustava su [12]:

- omogućava prijenos velikih snaga
- mali dijelovi elemenata hidrauličkog sustava čime je moguća ugradnja u male prostore
- jednostavno rukovanje i upravljanje
- pokretanje iz stanja mirovanja pod punim opterećenjem
- velika krutost sustava zbog niske stlačivosti
- jednostavno akumuliranje hidraulične energije
- jednostavno odvođenje topline
- visoka pouzdanost i dugi vijek trajanja pojedinih elementa hidrauličnog sustava.

Nedostaci hidrauličkog sustava su [12]:

- osjetljivost na nečistoće
- zapaljivost kad je radna tekućina mineralno ulje
- zahtjevno održavanje
- visoka emisija buke
- složeni i skupi postupci proizvodnje elemenata sustava
- temperatura utječe na viskoznost radne tekućine
- kod niskog stupnja iskoristivosti dolazi do povećanog zagrijavanja radne tekućine
- pri havarijama moguća su onečišćenja okoliša
- potreba za povratnim vodom.

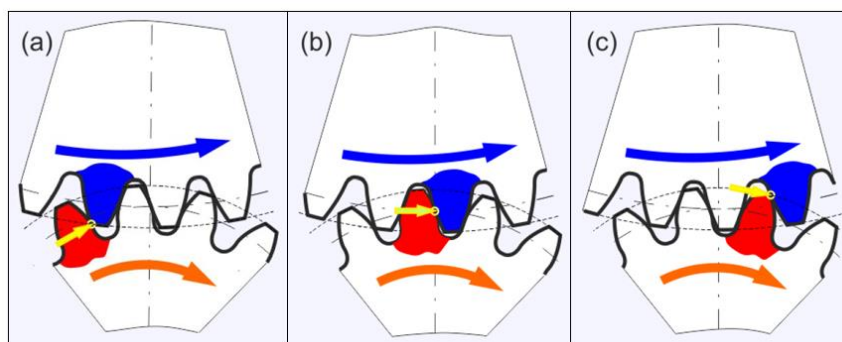
2.1.4. Primjena hidrauličkog sustava

Hidraulički sustavi nalaze se u brojnim industrijama gdje je potrebna velika snaga i sigurnost poput avioindustrije i automobilske industrije, brodogradnje, građevinarstva, a primjeri koji koriste hidraulički sustav su liftovi, žičare, pokretni mostovi, kočnice, bageri, viličari, dizalice i slično. Hidraulički sustavi su veoma pouzdani stoga je mala vjerojatnost da će se pokvariti, što je iznimno važno za sigurnost ljudi, a i okoliša [11].

3. ZUPČANICI

Zupčanici su strojni dijelovi većinom okruglog oblika, a zadatak im je prijenos okretnog momenta na ostale strojne dijelove pomoću zubi koji su u zahvatu. Zupčanici su učvršćeni s vratilom, a zubi su im ravnomjerno raspoređeni po obodu. Kada se dva zupčanika nađu u zahvatu, govori se o zupčanom prijenosniku. U njihovom zahvatu važno je razlikovati pojmove pogonskog i gonjenog zupčanika. Na pogonski zupčanik se dovodi snaga, a preko gonjenog se ta snaga prenosi na ostale strojne dijelove. Da bi zupčani prijenos uopće mogao funkcionirati, smjerovi okretanja zupčanog para moraju biti suprotni [13]. Princip rada zupčanika (slika 20) može se opisati na sljedeći način [13]:

- zupčanici se okreću te uspostavljaju kontakt s zubima
- daljnjim okretanjem dolazi do valjanja zubi jedan po drugome
- prekid kontakta.



Slika 20. Princip rada zupčanika [14]

Prijenosni omjer predstavlja omjer kutne brzine pogonskog i gonjenog zupčanika, a računa se kao omjer broja zubi pogonskog i gonjenog zupčanika. Prijenosni omjer označava se s i te je prikazan jednadžbom 2 [13]:

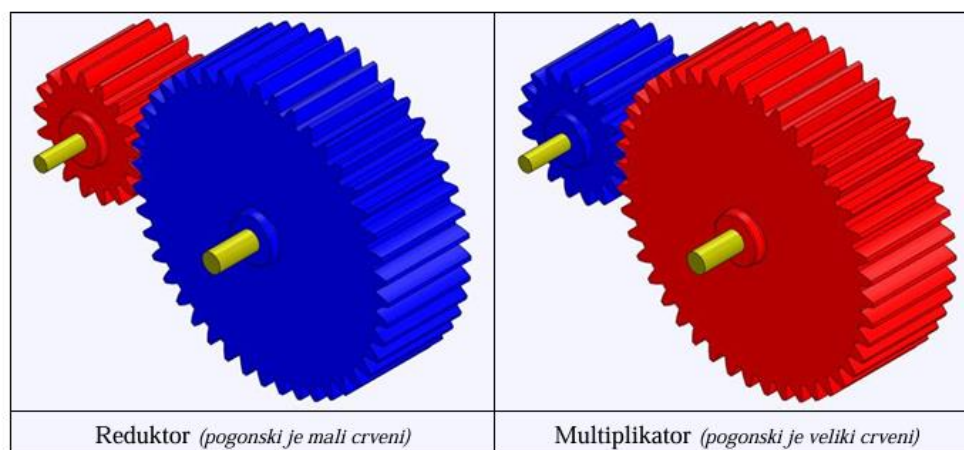
$$i = \frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{z_B}{z_A} \quad (2)$$

u kojoj su:

- ω_A - kutna brzina pogonskog zupčanika, [rad/s]
- ω_B - kutna brzina gonjenog zupčanika, [rad/s]
- z_A - broj zuba pogonskog zupčanika
- z_B - broj zuba gonjenog zupčanika.

Prijenosni omjer može biti manji, jednak ili veći od 1, a to znači sljedeće [13]:

- u slučaju kada je prijenosni omjer 1, tada se radi u zupčanicima jednakih veličina (jednak broj zubi, promjera, brzina, momenta).
- u slučaju kada je prijenosni omjer manji od 1, pogonski zupčanik je veći o gonjenoga. Ulazna brzina manja je od izlazne, što znači da za vrijeme jednog punog okreta većeg pogonskog zupčanika manji gonjeni zupčanik mora obaviti više okretaja. Takav mehanizam naziva se multiplikacija, a stroj za to je multiplikator.
- u slučaju kada je prijenosni omjer veći od 1, pogonski zupčanik je manji o gonjenoga. Ulazna brzina veća je od izlazne, što znači da za vrijeme jednog punog okreta većeg gonjenog zupčanika manji pogonski zupčanik mora obaviti više okretaja. Takav mehanizam naziva se redukcija, a stroj za to je reduktor. Slika 21 prikazuje primjer multiplikatora i reduktora.



Slika 21. Zupčani par reduktora i multiplikatora [14]

Prednosti zupčanog prijenosa su sljedeće [13]:

- veliki stupanj korisnog djelovanja ($\geq 0,98$)
- moguća izrada zupčanika malih i velikih dimenzija
- dugi vijek trajanja
- zbog geometrije daju konstantan prijenosni omjer
- prijenos od najmanjih do najvećih snaga te najmanjih i najvećih brzina
- tihi način rada.

Mane zupčanog prijenosa su sljedeće [13]:

- visoka cijena izrade
- velika krutost koja izaziva pojavu vibracija i šumova
- potrebna točna i precizna obrada.

3.1. Zupčanci s ravnim zubima

Zupčanci s ravnim zubima (eng. *spur gears*) su najčešća vrsta zupčanika koji se sastoje od ravnih zuba po cijelom obodu. Kontakt zuba se stvara u jednoj točki te se rotiranjem zupčanika odvija po pravcu koji se naziva zahvatna linija. Zahvatna linija predstavlja sve točke na bokovima zupčanika koji su u dodiru. Kod izrade bokova treba paziti da pri zahvatu oblik boka može ravnomjerno i kontinuirano prenijeti okretno gibanje. Radi lakše izrade i normizacije zahvatne linije, ona može imati dva oblika [15]:

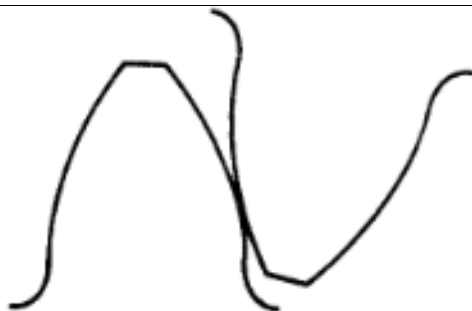
- cikloidno ozubljenje,
- evolventno ozubljenje.

Kod cikloidnog ozubljenja zahvatna linija se sastoji od dva kružna luka (bokovi su cikloidno zakrivljeni). U zahvatu su konveksni dijelovi tjemena zuba, dok je podnožje zuba konkavno (slika 22). To omogućuje da se smanji kontaktni pritisak i trošenje bokova. Naime, izrada ovakvih bokova je puno teža nego kod evolventnog ozubljenja, stoga se ne primjenjuje pretežno u strojarскоj industriji, dok recimo veliku primjenu nalazi u industriji satova [15].



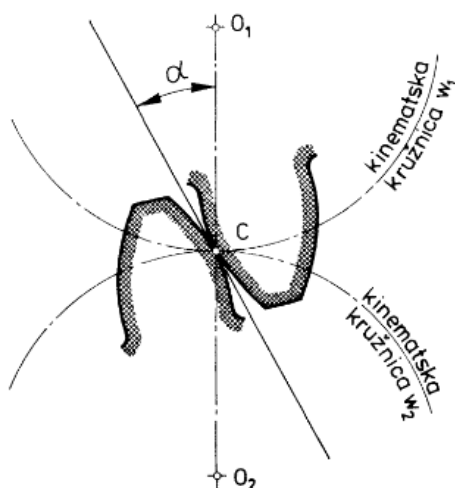
Slika 22. Zahvat cikloidnih bokova [15]

Kod evolventnog ozubljenja zahvatna linija je pravac koji tangira temeljnu kružnicu evolventnih bokova u zahvatu. U zahvatu su konveksni dijelovi tjemena i podnožja zuba (slika 23).



Slika 23. Zahvat evolventnih bokova [15]

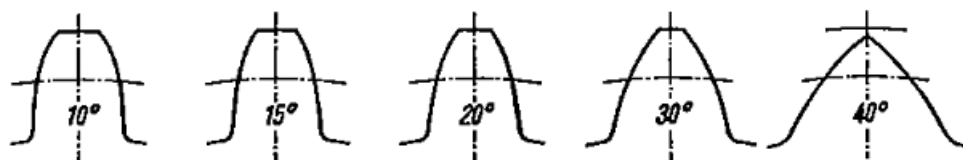
Zahvatni kut (oznaka α) je kut što ga zatvara tangenta u točki C sa zahvatnom linijom i po standardu on iznosi 20° (slika 24).



α = kut zahvata

Slika 24. Kut zahvata α [15]

Također, promjenom zahvatnog kuta α ograničava se broj zubi. Što je veći kut zahvata, time se smanjuje granični broj zubi, a to dovodi do zašiljenosti vrha zuba [13] (slika 25).



Slika 25. Utjecaj kuta zahvatne linije na oblik zuba [13]

Kod cikloidnog ili evolventnog ozubljenja potrebno je da ono osigura sljedeće uvjete [15]:

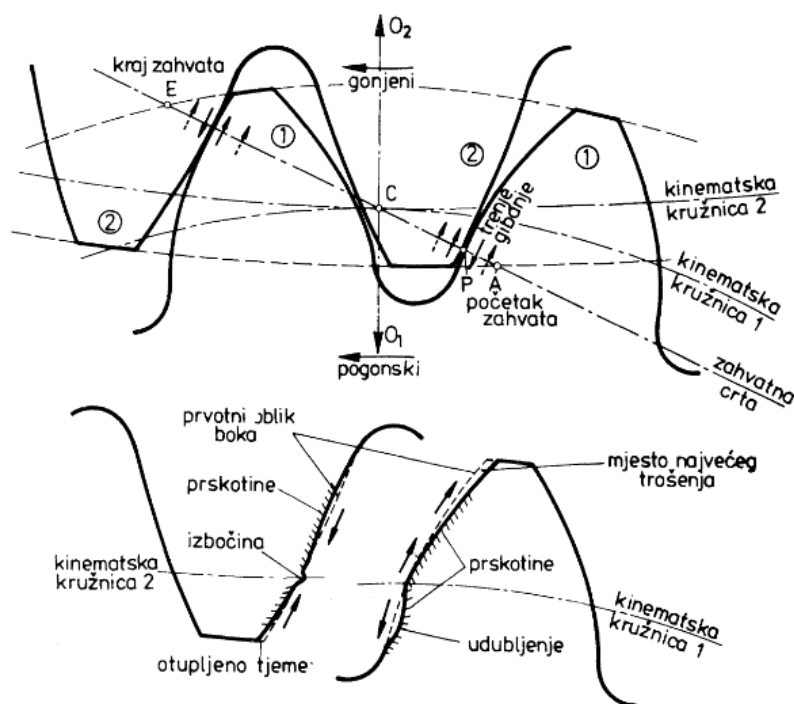
- obodne brzine moraju se prenositi ravnomjerno
- bokovi trebaju biti što jednostavniji i moraju se moći točno izraditi
- naprezanja u presjeku zubi trebaju biti što manja
- klizanje bokova treba biti minimalno kako bi se smanjilo trošenje i povećala iskoristivost, ali i smanjili gubitci izazvani zbog trenja
- što bolju nosivost
- nagib zahvatne linije mora biti konstantan kako bi se osigurao stalan smjer sile sa zuba na zub.

Niti jedan od ova dva ozubljenja ne ispunjavaju sve navedene uvjete, no većinom se koristi evolventno ozubljenje zbog jednostavne i vrlo precizne izrade [15].

3.1.1. Klizanje bokova

Prilikom zahvata zubi dolazi do klizanja bokova. Na slici 26 prikazani su smjerovi gibanja točaka dodira bokova te smjerovi sila trenja pogonskog i gonjenog zupčanika. Točka P predstavlja zahvat bokova, a gibanje zupčanika je prikazano strelicama ← (prema lijevo). Smjer sile trenja je suprotan od smjera gibanja točaka dodira u razmaku od točke A do točke C. Na boku 2 (gonjeni zupčanik), smjer sile trenja i gibanja je isti. Od točke C do točke E je obrnuta situacija. Na boku 1 (pogonski zupčanik) sila trenja i gibanja imaju isti smjer i to prema tjemenu zupčanika, dok je na boku 2 (gonjeni zupčanik) smjer gibanja točaka usmjeren prema podnožju, a sila trenja prema sredini (kinematska kružnica). Kao posljedica sile trenja na bokovima, na boku 1 će površinski slojevi biti gurani od kinematske kružnice prema tjemenu i podnožju zuba, a na boku 2 prema kinematskoj kružnici. Bitno je spomenuti da oko kinematske kružnice nema klizanja zbog jednakih tangencijalnih komponenti brzina (u tom području ne bi trebalo biti trošenja). Na slici vidimo da zbog velikih opterećenja dolazi i to prskanja površinskih slojeva. Bok 1 će tako zbog sabijanja površinskih slojeva prema kinematskoj kružnici stvoriti izbočinu, a bok 2 zbog razvlačenja površinskog sloja stvara udubljenje.

Trošenje zuba se može smanjiti ako se povećaju kutevi zahvatne linije i smanje visine zuba [15].



Slika 26. Smjer gibanja točaka dodira bokova i smjer sila trenja na bokovima pogonskog i gonjenog zupčanika [15]

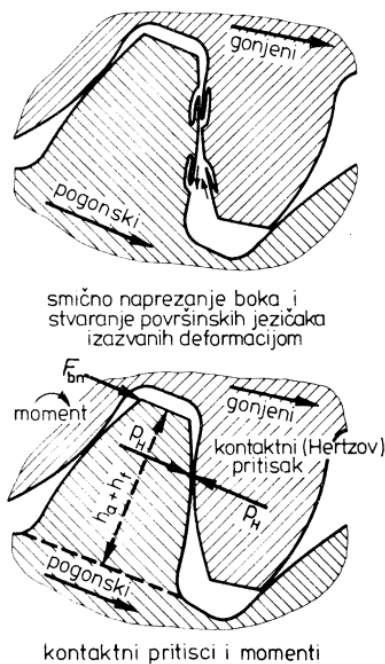
3.1.2. Nosivost zupčanika

Svaki strojni dio, pa tako i zupčanik, mora biti ispravan unutar nekog predviđenog vijeka trajanja. Naime, oštećenja su uvijek prisutna i mogu se podijeliti na sljedeće:

- pogonsko opterećenje
- pogonski uvjeti
- stanje materijala
- promjene na zubu izazvane raznim štetnim utjecajima.

Pogonska opterećenja izazivaju smična naprezanja bokova, kontakti pritisci te naprezanja u korijenu i uzduž bokova zubi. Pri zahvatu zubi stvara se sila u smjeru zahvatne linije koja se dijeli na obodnu i radijalnu komponentu. Na uzdužnoj liniji dodira bokova stvaraju se naprezanja površinskih slojeva izazvana kontaktnim pritiscima. Radi toga će se bokovi deformirati elastično i plastično, a na raspodjelu i veličinu tih tlačnih naprezanja utječu sila trenja i pritisak maziva. U korijenu zuba javljaju se savojna naprezanja izazvana obodnom komponentom sile, a raspored tih naprezanja ovisi o elastičnoj deformaciji zuba, greškama ozubljenja te broju okretaja zupčanika. Na slici 27 prikazano je mehaničko opterećenje zuba, u

ovome slučaju gornji zupčanik (gonjeni) izbjegava preuzimanja opterećenja što rezultira time da će se promijeniti položaj hvatišta sila (na gonjenom zupčaniku prema podnožju, a na pogonskom prema tjemenu zuba). Samim time pogonski zupčanik jače je savojno opterećen [15].



Slika 27. Mehaničko opterećenje zuba [15]

3.2. Materijali za izradu zupčanika

Pri izboru materijala za zupčanike, treba zadovoljiti određene uvjete i zahtjeve kao što su [16]:

- tvrdoća
- obradivost
- čvrstoća
- žilavost
- cijena.

Zbog nabrojanih zahtjeva izbor materijala za zupčanike su metali.

Čelik je zbog navedenih uvjeta najbolji izbor materijala za zupčanike, ponajviše zbog najveće nosivosti. Zbog toga se koriste ugljični nelegirani čelici i legure čelika koji se prethodno toplinski obrađuju.

Toplinska obrada je postupak u kojem se predmet izlaže temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se dobila željena mikrostruktura, a time i željena svojstva. Kod zupčanika ciljevi toplinske obrade su sljedeći:

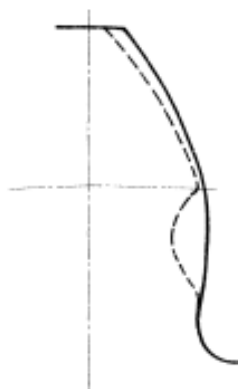
- povećanje čvrstoće i bolja raspodjela naprezanja u korijenu zuba čime se osigurava bolja opterećenost korijena zuba
- osigurati bolju opterećenost bokova i otpornost na trošenje izazvano trenjem
- osigurati bolju obradivost.

Zupčanci se mogu toplinski obraditi preko čitavog volumena ili površinski. Pod toplinsku obradu preko čitavog volumena spadaju postupci kaljenja, poboljšavanja, popuštanja i žarenja, dok kod površinske toplinske obrade spadaju modifikacije površine koje se dijele na toplinske (površinsko kaljenje) i toplinsko-kemijske (difuzija nemetalnih elemenata) [17].

4. OŠTEĆENJA I KVAROVI KOD ZUPČANIKA

4.1. Trošenje zupčanika

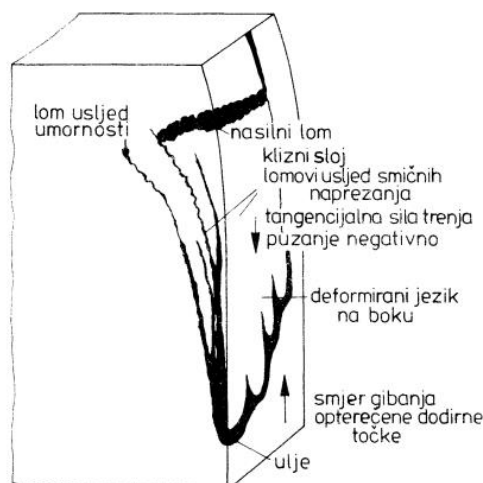
Trošenje je najčešći oblik oštećenja zupčanika, a javlja se u obliku loma zuba ili pojave pittinga (jamica) na površini zuba. Trošenje bokova javlja se zbog jako niske viskoznosti ulja pa se ne stvara kontinuirani uljni film. Problem niske viskoznosti ulja rješava se dodavanjem aditiva za povećanje viskoznosti. Ako je hrapavost bokova povećana, povećati će se i trošenje. Najveća trošenja javljaju se u tjemenu i podnožju boka (slika 28).



Slika 28. Trošenje bokova [15]

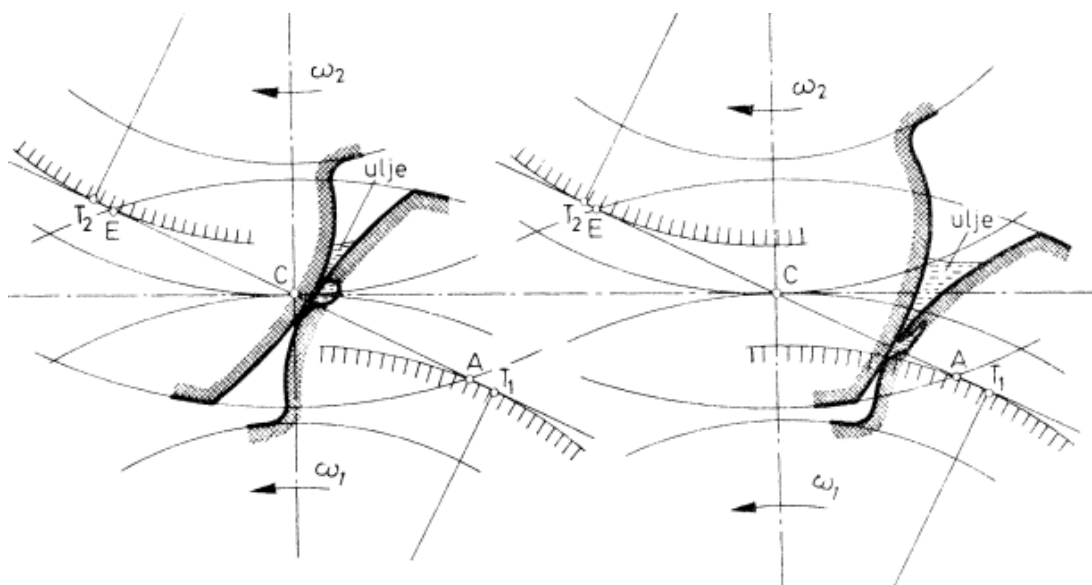
4.2. Nastajanje pitting-a (jamičenje)

Pitting je oblik oštećenja kod zupčanika gdje nastaju sitne rupice (mogu biti od nekoliko mikrometara do par milimetara). Rupice nastaju kao posljedica cikličkih opterećenja, kontaktnih pritisaka i prisutnosti maziva. Nastaju na mjestima najvećih smičnih naprezanja izazvanih koncentriranim naprezanjima od kontaktnih pritisaka. Ako su zupčanici od istog materijala, početak rupica javit će se u podnožju pogonskog zupčanika zato jer sila trenja djeluje od kinematske kružnice prema tjemenu i podnožju (slika 29). Pogonski zupčanik je češće u zahvatu stoga on ima najveću vjerojatnost nastajanja rupica [15].



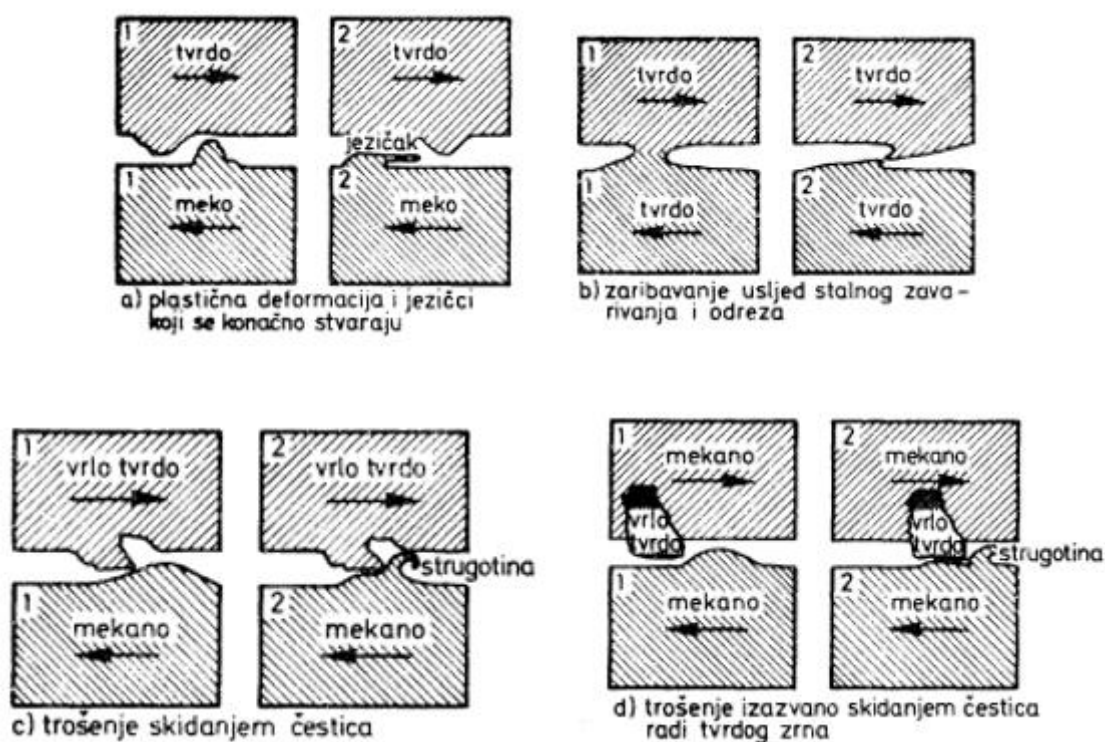
Slika 29. Nastajanje rupičenja (pittinga) na podnožju pogonskog zupčanika [15]

Mehanizam stvaranja rupica detaljnije je opisan slikom 30. Kada se bokovi zuba nalaze u zahvatu, javljaju se tlačna (kontaktni pritisak) i smična (klizanje bokova) naprezanja. Koncentracija naprezanja javlja se zbog zareza koji su izazvani hrapavošću bokova. U tom području dolazi do očvršćivanja materijala, a klizanje bokova dovodi do stvaranja mikropukotina. Ulje koje služi za podmazivanje utiskuje se u mikropukotine, te kada dođe do zahvata bokova oni stvaraju pritisak na zatvoreno ulje u pukotinama. To dovodi do rasta pukotine i lomova malih djelića materijala s te pukotine [15].



Slika 30. Nastajanje rupičenja (pittinga) [15]

Česti je slučaj da se površinski dio zuba otkine te kao takav djeluje kao abraziv u tribosustavu. Na slici 31 a) dolazi do plastične deformacije mekšeg materijala zbog kontakta s tvrdim materijalom. To rezultira stvaranjem "jezičaka" ili malih deformacija izbočine mekšeg materijala. Slika 31 b) prikazuje mikrozavarivanje izbočina materijala na mjestu kontakta. Uslijed pomicanja zupčanika dolazi do kidanja mikrozavarenih spojeva. Slika 31 c) prikazuje abrazijsko trošenje gdje tvrdi materijal klizi preko mekšeg materijala i time dolazi do uklanjanja čestica s mekšeg materijala. Uklonjene čestice nazivaju se "strugotine". Slika 31 d) također prikazuje abrazijsko trošenje koje nastaje kada tvrdi abraziv upadnu između dva meka materijala. Tvrdi zrna (uglavnom oksidi iz ulja za podmazivanje) djeluju kao abraziv i uklanjaju čestice s površine mekših materijala [15].

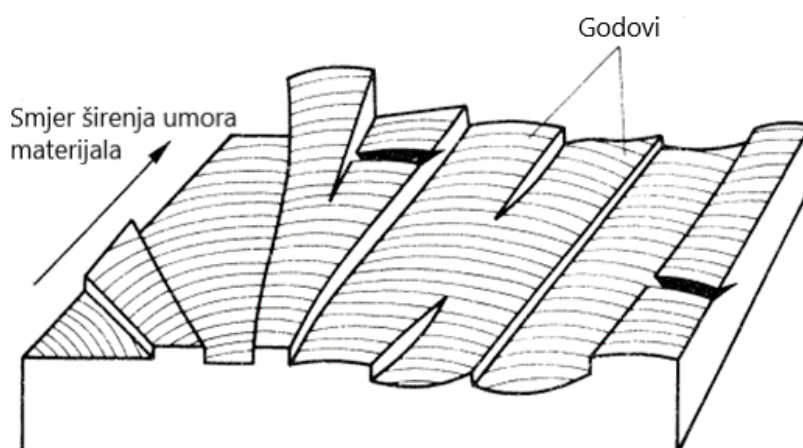


Slika 31. Razni oblici trošenja izazvani klizanjem bokova [15]

Na oštećenja zubi ne utječu samo lomovi već i deformacije vratila, kućišta koje utječu na cijeli prijenosni sustav.

4.3. Umor materijala

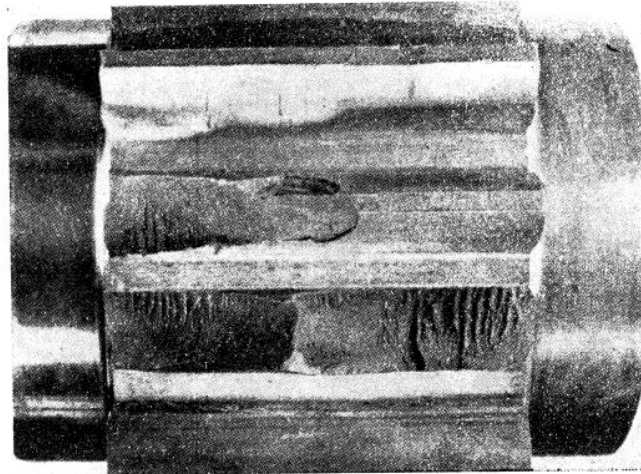
Umor materijala je oblik trošenja koji se javlja zbog cikličkih promjena opterećenja. Umor materijala prepoznatljiv je po brazdama koje podsjećaju na godove drveta (slika 32). Početak loma najčešće nastaje zbog velike koncentracije naprezanja i to na mjestima prijelaza boka u korijen zuba, kod brušenja bokova (ako su brušeni samo bokovi, a ne i korijen zuba, tada nastaje zarez između brušenog i nebrušenog dijela koji kasnije djeluje zarezno), krive toplinske obrade, oštrog prijelaza između tvrdog i mekog sloja materijala, zarezima kod korijena zuba [16].



Slika 32. Lom uslijed umora materijala [15]

4.4. Lom materijala zbog preopterećenja

Lom materijala zbog preopterećenja nastane kada zbog trenutnih opterećenja naprezanja prelaze čvrstoću loma (slika 33). Do toga dolazi kada se jave preopterećenja koja su uzrokovana udarcima kao posljedica naglog porasta obodne brzine. Osim udaraca, do preopterećenja mogu dovesti neuravnoteženost prijenosnog mehanizma, greške montaže, istrošenosti ležaja, deformacije kućišta, istrošenost bokova, nevidljive šupljine u materijalu nastale tokom lijevanja. Opterećenja koja dovode do loma su 3 do 4 puta veće nego kod umora materijala [15].



Slika 33. Lom uslijed preopterećenja materijala [15]

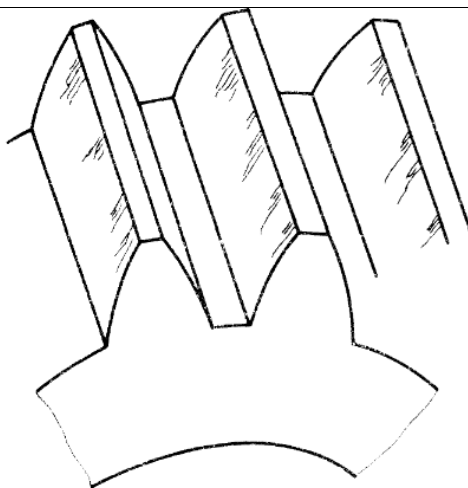
Najčešći početci loma javljaju se na prijelaznom radijusu u korijenu zuba zbog neprikladne toplinske obrade (slika 34) [15].



Slika 34. Lom na mjestu završetka zakaljene zone [15]

4.5. Zaribavanje

Oštećenje bokova moguće je zbog zaribavanja. Zaribavanje je oštećenje koje nastaje zbog istodobnog djelovanja visokih pritisaka i brzina klizanja, u većini slučajeva u blizini tjemena i podnožja. Posljedica toga su udubljenja koja nastaju u smjeru klizanja, a zaribavanje može biti lako i teško. Lako zaribavanje stvara površinu koja izgleda kao da je jetkana (slika 35), dok se kod teškog zaribavanja zubi lome [15].



Slika 35. Početak zaribavanja (lako zaribavanje) [15]

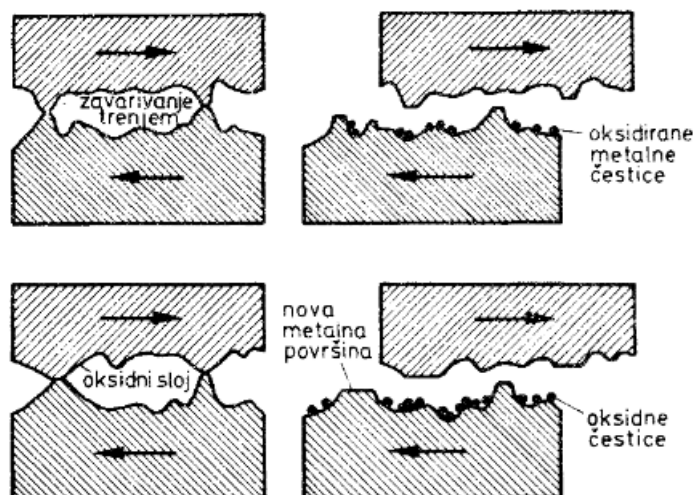
Glavni razlog zašto dolazi do zaribavanja je prekid uljnog filma upravo zbog visokih opterećenja i brzina klizanja. Time dolazi do metalnog dodira, koje zbog trenja stvara visoke temperature, lokalno zagrijavanje te na kraju zavarivanje. Nakon toga, takvi zavareni dijelovi se odlome i dovode do zaribavanja.

Zaribavanje je moguće riješiti upotrebom ulja s visokom viskoznošću koja sadrže aditive za visoke pritiske.

Konstruktivski se zaribavanje može riješiti tako da se koriste zupčanicima s manjim zubima jer se kod velikih zuba stvaraju velike brzine klizanja, dok manji zubi imaju manju dinamičku izdržljivost na savijanje, samim time i opterećenje te niže brzine klizanja. Također, preporučljivo je da zupčanicima koji su u paru budu od različitih vrsta čelika te da pogonski zupčanik ima veću tvrdoću od gonjenoga [15].

4.6. Korozija

Pojava korozije kod zupčanika najčešće je uzrokovana oksidacijom ulja. Tribokorozija nastaje kada na dvije površine triboelementa nastane oksidni sloj koji se zbog njihovog gibanja ošteti. Time nastaje nova metalna površina koja vrlo brzo oksidira, produkti oksidacije rastu te zbog velikih sile budu utisnuti u površine bokova (slika 36). Tribokorozija se najčešće javlja u obliku crvenosmeđih korozijskih produkata [15].



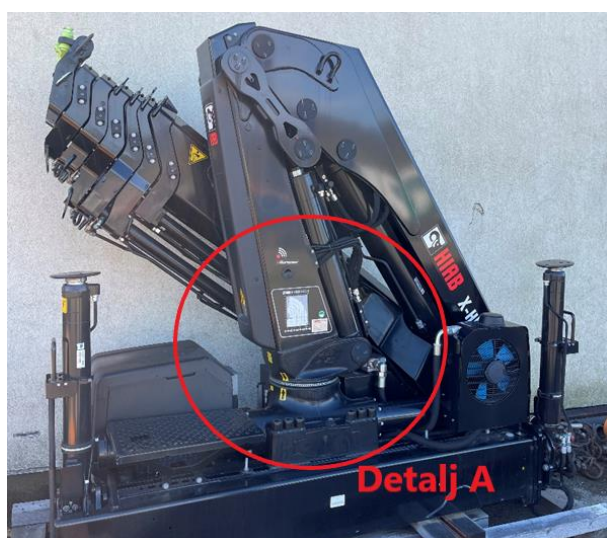
Slika 36. Tribokorozija [15]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada ispitati će se mikrostruktura, kemijski sastav i tvrdoća zupčanika hidrauličke dizalice radi utvrđivanja nastalih oštećenja i trošenja.

5.1. Analiza i vizualni pregled zupčanika hidrauličke dizalice

Analizirani zupčasti par sastoji se od zupčaste letve te zupčanika s ravnim zubima hidrauličke dizalice HIAB X-HIDUO – 046 koja služi za utovar i istovar stupova za električnu mrežu. Snaga hidrauličke dizalice izražava se preko njezinog okretnog momenta koji iznosi 39 kNm, maksimalni doseg je 6,3 m, maksimalni prijenosni kapacitet je 1,88 t pri minimalnoj udaljenosti dok se nosivost smanjuje s povećanjem udaljenosti. Dizalica X-HIDUO – 046 ima oznaku CE koja označava potvrdu proizvođača da proizvod ispunjava pravne zahtjeve Europske unije za stavljanje na tržište, a HIAB-ove dizalice dolaze s dvogodišnjom garancijom na dizalice te petogodišnjom garancijom na sve čelične dijelove [21]. Vijek trajanja ovakvih dizalica ovisi o puno faktora poput načina održavanja, vremenu upotrebe, uvjetima rada, no uz redovito servisiranje i održavanje, korištenje originalnih rezervnih dijelova i pridržavanja uputa za korištenje mogu trajati i preko 10 godina, čak i u zahtjevnim uvjetima rada. Projektirano vrijeme rada zupčanika je 8000 do 10000 sati, a analizirani zupčanik oštećen je nakon 400 sati. Na slici 37a) prikazana je hidraulička dizalica i označen detalj A, koji prikazuje stup dizalice u kojem se nalazi analizirani zupčanik, slika 37b).



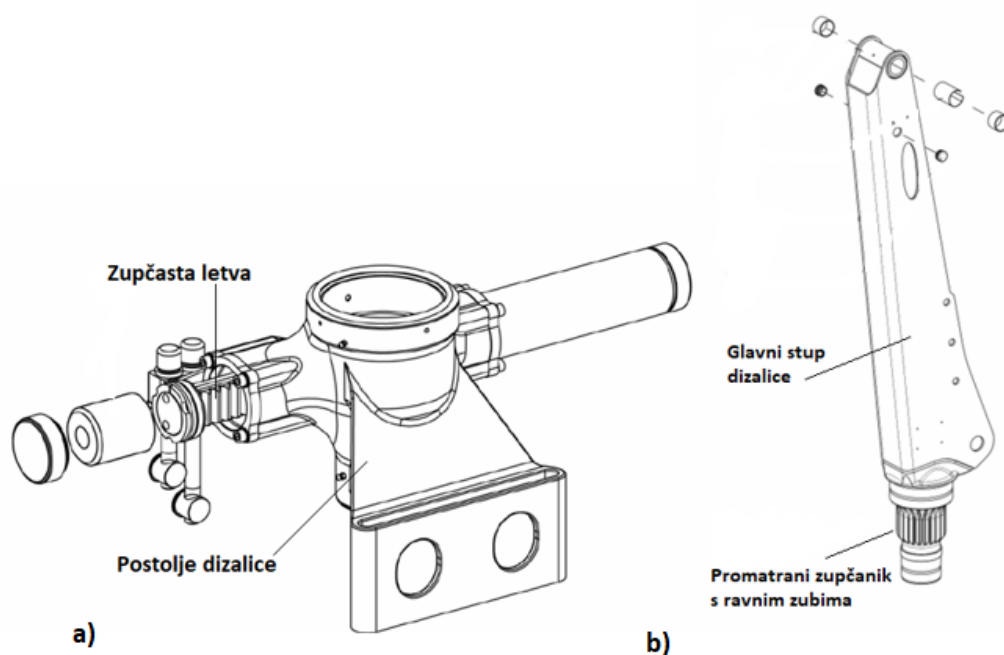
a)



b)

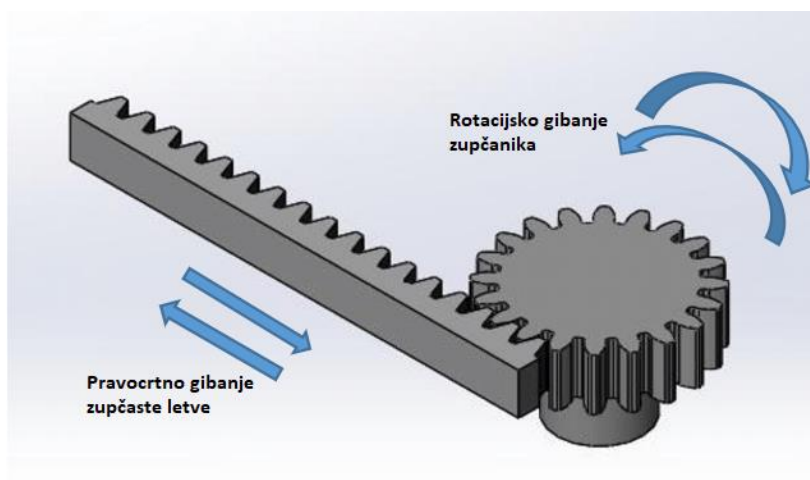
Slika 37. a) Hidraulička dizalica, b) detalj A (stup dizalice)

Zupčasta letva nalazi se u postolju dizalice (slika 38a), dok se analizirani zupčanik nalazi na glavnom stupu dizalice (slika 38b).



Slika 38. a) Zupčasta letva, b) analizirani zupčanik [18]

Pravocrtno kretanje zupčaste letve u kontaktu s zupčanikom stvara rotacijsko gibanje zupčanika, a samim time i glavnog stupa dizalice (slika 39). U slučaju oštećenja ili puknuća zupčanika, zupčanik se zajedno s osovinom reže s glavnog stupa te se zavaruje zamjenski zupčanik.



Slika 39. Prikaz gibanja zupčaste letve i zupčanika [18]

Na slici 40 prikazan je zupčanik prije čišćenja i odmašćivanja na kojoj je označeno mjesto oštećenja zupčanika tj. loma zubi zupčanika. Na slici 41 prikazan je detalj A sa slike 40.



Slika 40. Analizirani zupčanik prije čišćenja i odmašćivanja



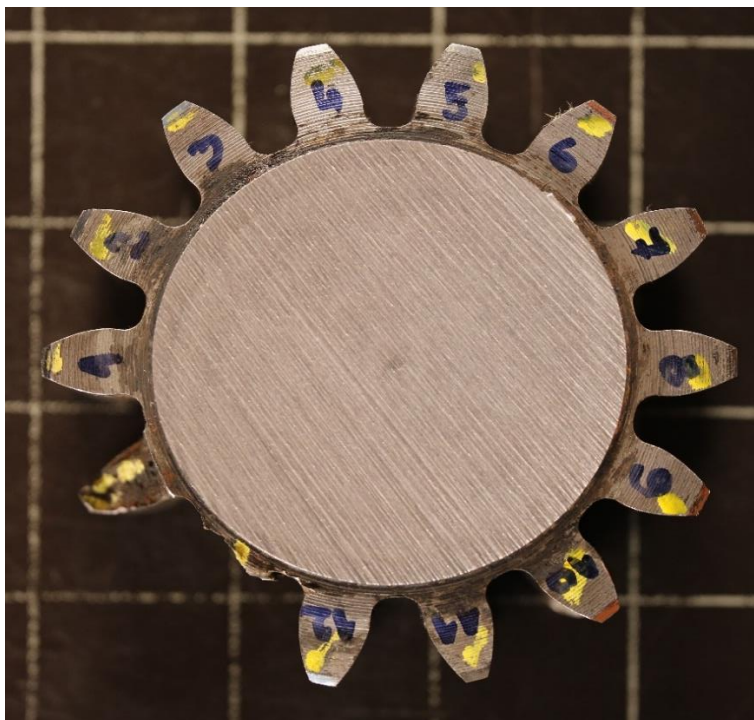
Slika 41. Detalj A: odlomljeni zubi zupčanika

Prije mikroskopske analize zupčanik je potrebno odmastiti i očistiti. Postupak čišćenja proveo se u ultrazvučnom čistaču u otopini 96% etanola. Ultrazvučni čistač služi za uklanjanje jakih prljavština s teško dostupnih mjesta, a čišćenje se odvija vibriranjem tekućine (slika 42). Postupak čišćenja ponavljao se 4 puta dok nije postignuta zadovoljavajuća čistoća koja je potrebna za daljnja ispitivanja.

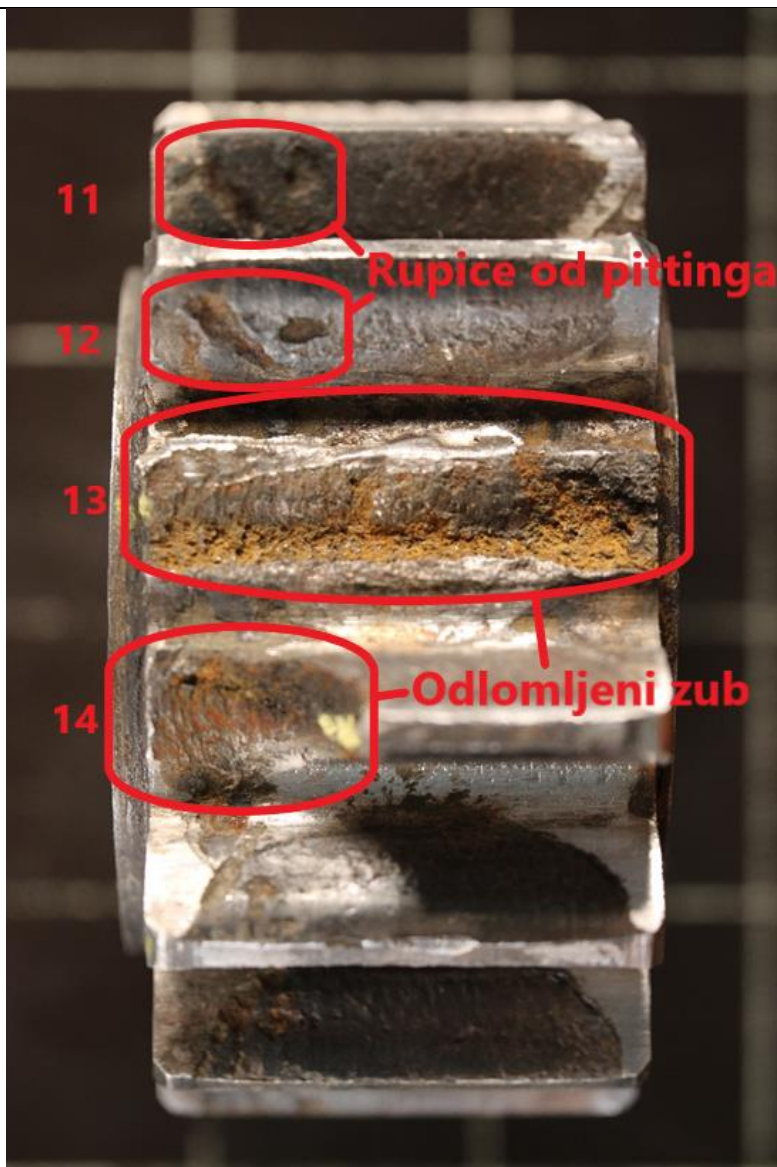


Slika 42. Ultrazvučni čistač i sredstvo za čišćenje

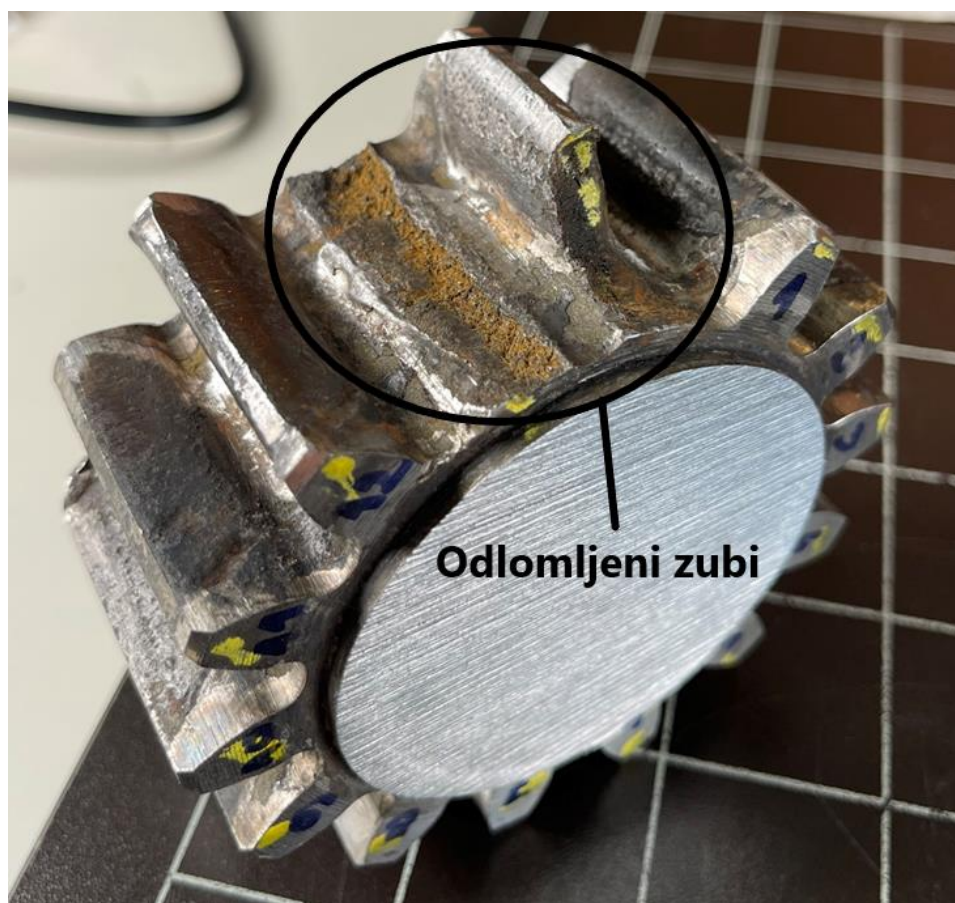
Analizirani zupčanik se sastojao od 14 zuba na svom obodu, no nakon kvara odlomljen je jedan i pol zub, dok svi preostali zubi imaju tragove trošenja (pitting). Na slici 43 prikazani su označeni zubi zupčanika, a tragovi trošenja zupčanika prikazani su na slikama 44, 45, 46, 47, 48.



Slika 43. Označeni zubi zupčanika



Slika 44. Tragovi trošenja na zubima zupčanika (zubi broj 11, 12, 13, 14)



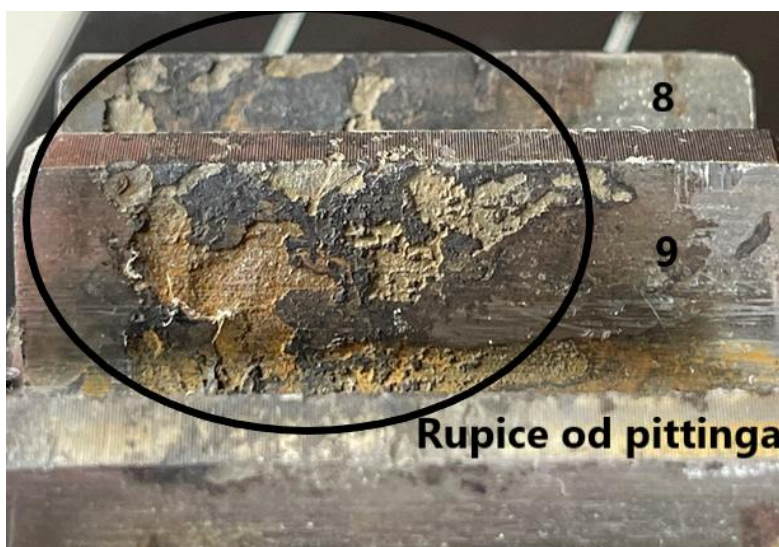
Slika 45. Odlomljeni zubi zupčanika (zubi broj 13, 14)



Slika 46. Piting na zubu 7



Slika 47. Piting na zubima 4, 5, 6



Slika 48. Rupice uzrokovane piting-om na zubu 8 i 9

5.2. Koraci ispitivanja

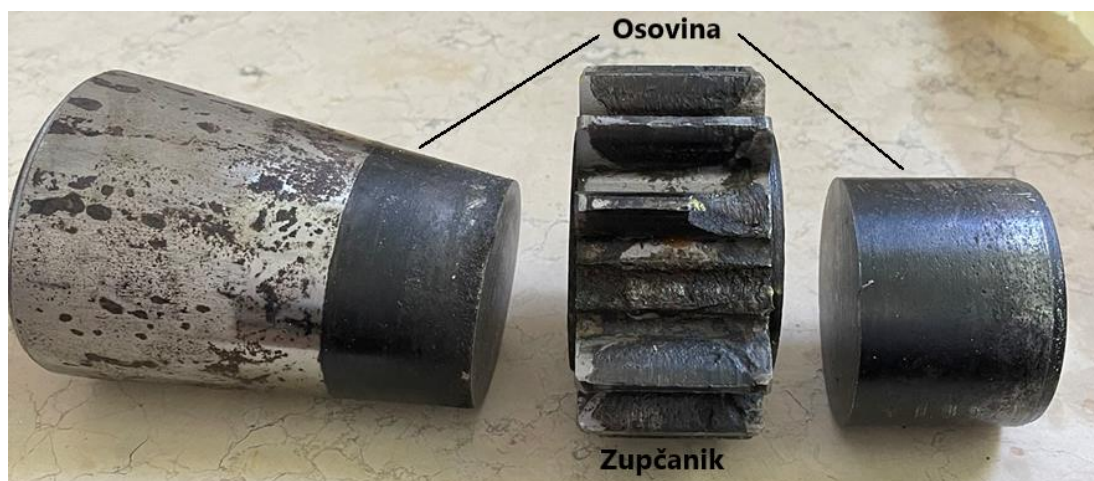
Ispitivanje uzorka zupčanika prikazano je tablicom 1.

Tablica 1. Koraci ispitivanja

Koraci ispitivanja	
1.	Rezanje uzorka
2.	Priprema uzorka
3.	Kemijska analiza
4.	Analiza mikrostrukture uzorka
5.	Mjerenje tvrdoće

5.2.1. Rezanje uzorka

Rezanje uzorka provedeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu FSB-a. Prije rezanja ispitivanog uzorka zupčanika bilo je potrebno zupčanik odrezati od njegove osovine (slika 49). Postupak rezanja proveden je na uređaju Mecatome T260 uz hlađenje vodenim mlazom kako ne bi došlo do utjecaja na mikrostrukturu materijala. (slika 50). Nakon odvajanja zupčanika od osovine odrezan je reprezentantni uzorak zuba za daljnju analizu.



Slika 49. Odrezani zupčanik i dijelovi njegove osovine



Slika 50. Mecatome T260

5.2.2. Priprema uzorka

Za pripremu odrezanoga ispitnog uzorka potrebni su sljedeći koraci:

1. Ulijevanje uzorka u polimernu masu
2. Brušenje
3. Poliranje
4. Nagrizanje.

Uzorci se ulijevaju u polimernu masu kako bi se omogućilo jednostavnije rukovanje.

Brušenjem se dobiva površina koja je ravna, bez tragova rezanja, čista od prljavština, oksida i adsorbiranih plinova koji bi utjecali na izgled mikrostrukture. Za dobivanje analiziranog uzorka korišteni su brusni papiri različitih granulacija (P320, P600, P1000, P2400 i P4000). Prilikom brušenja korištena je i voda kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

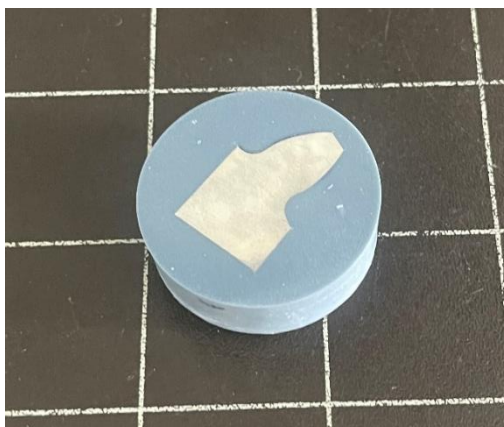
Poslije brušenja provedeno je poliranje kako bi se uklonile nepravilnosti nastale brušenjem i dobila glatka i ravna površina. Za potrebe poliranja korištena je tkanina, dijamantna pasta promjera 3 μm i 0,03 μm kao abraziv i lubrikant kao sredstvo za podmazivanje, a uređaj za poliranje Mecatech 250 prikazan je na slici 51.

Nagrizanje je završni korak pripreme uzorka gdje se selektivnim korodiranjem površine želi dobiti mikrostruktura. Metalni ispitni uzorak bio je kemijski nagrizan pri čemu se uzorak prvo uronio u sredstvo za nagrizanje (3% nital), zatim se prekinula reakcija vodom te se u konačnici ispirao alkoholom.



Slika 51. Uređaj za poliranje Mecatech 250

Pripremljeni ispitni uzorak prikazan je na slici 52.



Slika 52. Ispitni uzorak zupčanika

5.2.3. *Kemijska analiza*

Kemijska analiza uzorka napravljena je u Laboratoriju za metala FSB-a. Metoda za određivanje uzorka je optička emisijska spektrometrija, a korišteni instrument je spektrometar GDS 850 A, LECO. Rezultati mjerenja kemijskog sastava prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav zupčanika

%									
*C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0,47- 0,63	0,245	0,69- 0,70	<0,02	<0,03	0,14	0,035- 0,043	0,07- 0,09	0,05	ostatak

Iz dobivenih rezultata se može zaključiti da se radi o konstrukcijskom čeliku (ugljični, nelegirani) EN 10012-2: 1995, klase 1.0518 ili poznatom kao C56D [19].

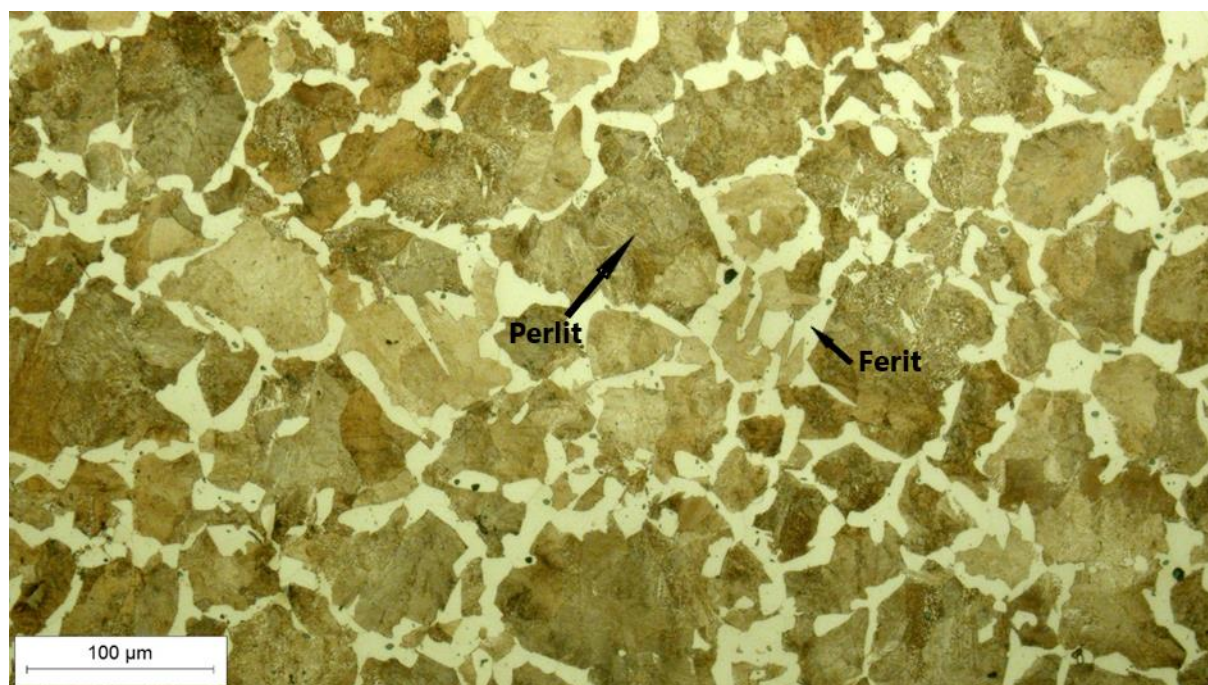
5.2.4. *Analiza mikrostrukture uzorka*

Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 (slika 50) korišten je za analizu mikrostrukture. Analizirana je površina poprečnog presjeka pod različitim povećanjima (50x, 100x, 200x i 500x).

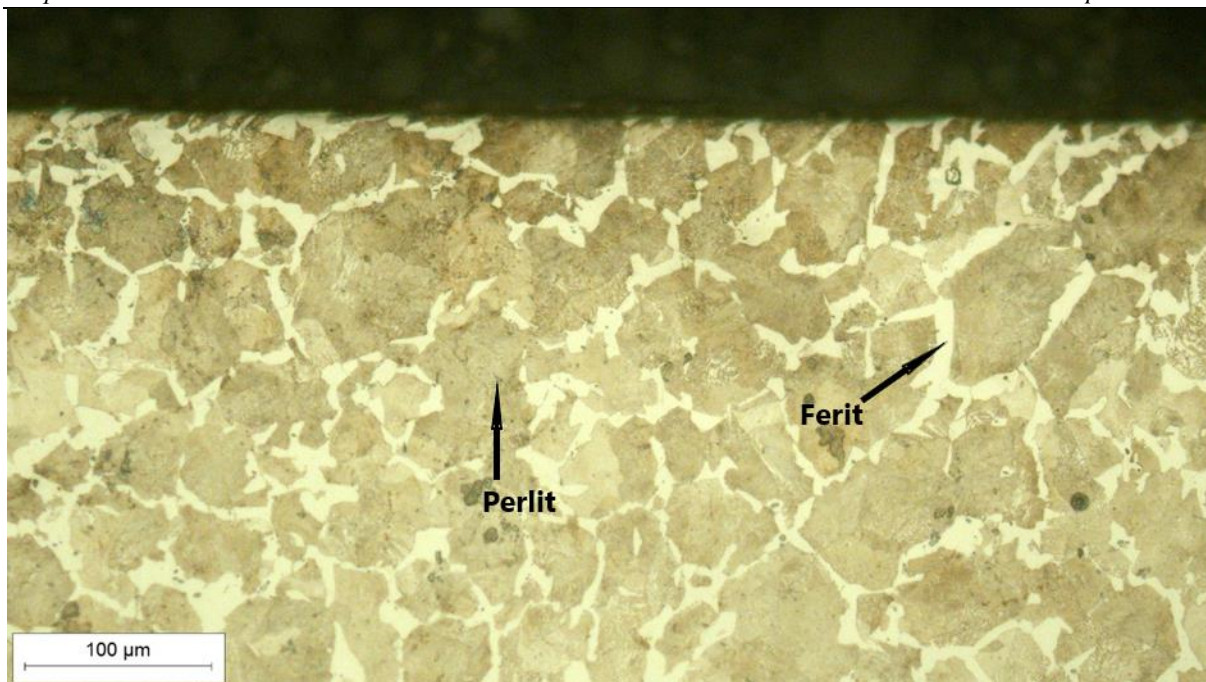


Slika 53. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Na slikama 54 i 55 prikazane su mikrostrukture jezgre i ruba zuba pri povećanju 200x.



Slika 54. Mikrostruktura jezgre zuba, povećanje 200x



Slika 55. Mikrostruktura ruba zuba, povećanje 200x

Analizom slika može se zaključiti da se radi o feritno-perlitno mikrostrukturi po cijelom presjeku zuba zupčanika.

5.2.5. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a na uređaju Zwick Roell ZHV μ . Metoda za mjerenje tvrdoće bila je po Vickersu (oznaka HV). Također, tvrdoća po Vickersu je mjera otpornosti što ga neki materijal pruža prodiranju dijamentne četverostrane piramide s vršnim kutom od 136°, opterećene silom F (N) [20].

Tvrdoća materijala po Vickersu računa se preko izraza 3 [20]:

$$HV = \frac{F}{A} \quad (3)$$

gdje su:

- F – sila utiskivanja, [N]
- A – površina utisnuta indenterom, [mm²],

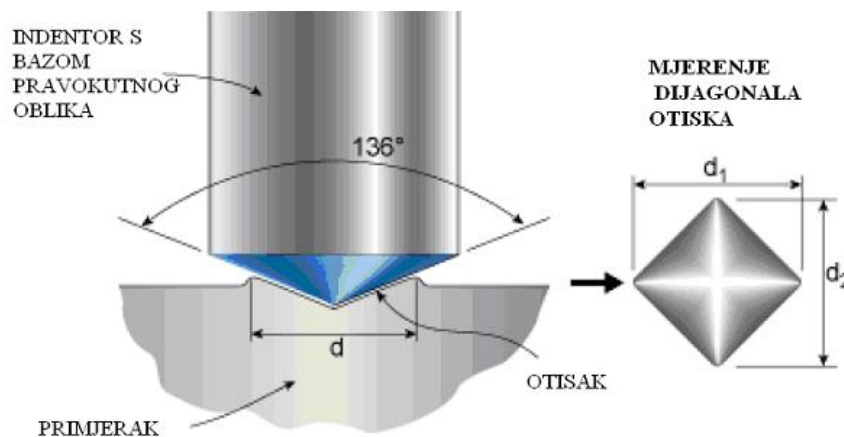
a površina utisnuta indenterom (A) računa se prema izrazu 4 [20]:

$$A = \frac{(d)^2}{2 \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)} \quad (4)$$

gdje je:

- d – srednja vrijednost dijagonale $d = \frac{(d_1+d_2)}{2}$, [mm].

Na slici 56 prikazan je oblik indentora i kontaktne površine kod Vickers metode mjerenja tvrdoće.



Slika 56. Prikaz ispitivanja tvrdoće po Vickersu [20]

Tvrdoća je mjerena od ruba prema sredini zupčanika koristeći opterećenje od 1000 g (HV=1) s korakom 0,1 mm. Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće zupčanika (HV1)

Udaljenost od površine [mm]	Tvrdoća (HV1)
0,1	206
0,2	223
0,3	218
0,4	217
0,5	208
0,6	211
0,7	210
0,8	207
0,9	214
1,0	214
1,1	205
1,2	206
1,3	205
1,4	211
1,5	214
1,6	199
1,7	206
1,8	203
1,9	225
2,0	211
2,1	206
2,2	213
2,3	215
Srednja vrijednost	211

Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće je 211HV1.

6. ANALIZA REZULTATA

Vizualnim pregledom zuba zupčanika uočeno je da je zub broj 13 djelomično odlomljen dok je zub broj 14 odlomljen po cijeloj svojoj duljini. Na bokovima i vrhovima svih zubi vidljive su jamice (pitting) koje su posljedica mehanizma trošenja umorom površine koji se javlja uslijed cikličkog opterećenja zubi.

Analiza mikrostrukture poprečnog presjeka zuba zupčanika prikazuje feritno-perlitnu mikrostrukturu.

Prema rezultatima mjerenja tvrdoće ne uočava se razlika u vrijednostima tvrdoće po presjeku od ruba prema jezgri zuba. Srednja vrijednost tvrdoće je 211HV1. Izmjerena tvrdoća odgovara prikazanoj feritno-perlitnoj mikrostrukturi. Iz navedenog može se zaključiti da na zupčanicu nije provedena potrebna toplinska obrada.

Iz dobivenih rezultata rezultata kemijske analize može se zaključiti da se radi o konstrukcijskom čeliku (ugljični, nelegirani) EN 10012-2: 1995, klase 1.0518 (C56D). Prema kemijskom sastavu za zadani zupčanik bilo bi potrebno provesti postupak toplinske obrade poboljšavanja zupčanika.

7. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu analiziran je uzrok loma zuba zupčanika hidrauličke dizalice HIAB X-HIDUO 046. Nakon vizualnog pregleda zupčanika i provedenih laboratorijskih ispitivanja, može se zaključiti sljedeće:

- Na površinama svih zuba zupčanika došlo je do trošenja zuba u obliku jamica tj., pittinga.
- Kemijskom analizom utvrđeno je da je materijal analiziranog zupčanika ugljični nelegirani konstrukcijski čelik EN 10012-2: 1995, klase 1.0518 (C56D).
- Analizom mikrostrukture i mjerenjem tvrdoće zaključeno je da je po cijelom presjeku feritno – perlitna mikrostruktura tvrdoće 211HV1.
- Do loma zubi zupčanika došlo je zbog umora materijala jer nije provedena zahtjevana toplinska obrada.

Kao preporuku za rješavanje problema potrebno je provesti odgovarajuću toplinsku obradu zupčanika prije ugradnje u dizalicu.

LITERATURA

- [1] Herold Z., Šćap D., Hoić M.: Prenosila i dizala , Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.
- [2] <https://www.carlsonattorneys.com/wp-content/uploads/2023/07/Tower-Crane-Diagram.png>, 12.09.2024.
- [3] <https://www.bigrentz.com/blog/parts-of-a-crane?srsId=AfmBOorMTG7DYsChaEB9La70t2OJ68BOTdLLUwpaM5Z4RItl1wkG FNIM>, 12.09.2024.
- [4] <https://www.maximcrane.com/blog/guide-to-types-of-cranes-for-construction/>, 12.09.2024.
- [5] Kacalak W., Budniak Z., Majewski M.: Stability Assessment as a Criterion of Stabilization of the Movement Trajectory of Mobile Crane Working Elements, Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, 2018, vol.23, No.1, pp.65-77, DOI: 10.1515/ijame-2018-0004
- [6] Spare-parts book, Model X-HIDUO 046, HIAB, 28.3.2024.
- [7] Nikolić Novaković: Pneumatika i hidraulika, II. dio, Hidraulika; Školske novine, 2011.
- [8] <http://www.ck.ba/novosti/arhimedov-vijak/>, 12.09.2024.
- [9] Šavar M., Virag Z., Džijan I.: Mehanika Fluida, predavanja; Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [10] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Hydraulic_Force%2C_language_neutral.png, 11.11.2024.
- [11] Petrić J.: Hidraulika i pneumatika, 1. dio: Hidraulika, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [12] <https://www.panagonsystems.com/hydraulic-pump-101-how-do-hydraulics-work/>, 11.11.2024.
- [13] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [14] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/14-ZupcaniPrijenosnici.pdf>, 11.11.2024.
- [15] Oberšmit E.: Ozubljenja i zupčanici; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1985.
- [16] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala; Sveučilište u Zagrebu, 2002.
- [17] Matijević B., Landek D.: Predavanja iz kolegija „Toplinska obrada metala“, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.

-
- [18] Murugadoss P., S Logeshwaran S., Naresh G., Ankush K., Sidhaant A., Shivam S.: Design and fabrication of Speed Bump for Energy Generation, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 993 (2020) 012149 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/993/1/012149
- [19] https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=768, 11.11.2024.
- [20] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1998.
- [21] HIAB X-HIDUO light cranes, HIAB, 2018.