

# Zahtjevi pri izboru materijala za potrošne dijelove građevinske mehanizacije

---

**Pavković, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni 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:235:571189>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Karlo Pavković**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Karlo Pavković

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem profesorici i mentorici Ireni Žmak na savjetima i idejama vezanim uz ovaj rad, te na konzultacijama punim strpljenja, kao i asistentu Janu Karlu Ormužu na korisnim savjetima vezanim uz pisanje samog rada.

Isto tako zahvaljujem i prof.dr.sc. Vesni Alar, kolegi Niki Radoniću i tvrtci Instrumentacije ELI-MP d.o.o. iz Zagreba koji su zaslužni za ostvarivanje eksperimentalnog dijela ovog rada.

Najveća zahvala upućena je mojim roditeljima i mome bratu zbog najveće moguće podrške i motivacije tijekom cijelog mog školovanja, te bezuvjetne obiteljske ljubavi.

Veliko hvala mojoj djevojci, kao i mojim prijateljima, koji su uvijek tu za mene, bez obzira koliko teško bilo.

Karlo Pavković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Pavković** JMBAG: **0035234147**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zahtjevi pri izboru materijala za potrošne dijelove građevinske mehanizacije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Requirements in the materials selection for construction machinery wear parts**

Opis zadatka:

Strojarstvo i niskogradnja tehničke su struke različitih područja rada, no zbog dijelom zajedničkih potrebnih znanja, inženjeri i tehničari ovih struka često surađuju na različitim poslovima, posebno pri projektiranju, izgradnji i održavanju infrastrukture i srodnih sustava. Pri oblikovanju (dizajnu, konstruiranju) strojarskih konstrukcija, potrebno je prije svega utvrditi vrstu i iznos dominantnog opterećenja, kako bi se za neki izabrani materijal, konstrukcije mogle ispravno dimenzionirati za funkcionalnost. Eksploataбилnost ili svojstvo postojanosti konstrukcije tijekom upotrebe, ovisi o radnim uvjetima kao što su temperatura, vlažnost, izloženost određenom mediju i njegovom mogućem strujanju, karakteristikama strujanja, prisustvu stranih čestica u fluidu, ultraljubičastom ili drugom zračenju itd. Pri razvoju proizvoda i izboru materijala vrlo je važno objektivno procijeniti kojim bi se tehnološkim postupkom određeni proizvod ili dio mogli oblikovati i zašto: kako spajati, rezati, bušiti, savijati itd. Ukoliko pri izboru materijala posegnemo za materijalima proizvedenim u skladu s normama koje se u našoj radnoj sredini i tržištu u pravilu teško nabavljaju, moguće je da time budućem održavanju postavljamo dodatne poteškoće. Kriterij ekonomičnosti materijala važan je u gotovo svim tehničkim primjenama, iako u pravilu ekonomičnost nije primarni zahtjev. Estetičnost materijala pri razvoju građevinske mehanizacije također prenosi poruku opasnosti pokretnih dijelova radnih strojeva za obližnje ljude i pridonosi boljoj vidljivosti. Svojstvo ekološkičnosti materijala u današnje je vrijeme nezaobilazno svojstvo za razmotriti pri razvoju ili redizajnu proizvoda. Pogotovo je recikličnost materijala važna kod potrošnih dijelova, kako bi se izbjeglo njihovo odlaganje ili uporaba umjesto recikliranja. Svojstvo ekološkičnosti nekog materijala može se procijeniti raznim parametrima, jedan od njih je npr. CO<sub>2</sub>-otisak. U okviru završnog rada potrebno je za izabrane potrošne dijelove građevinske mehanizacije razmotriti izbor materijala po kriterijima: funkcionalnosti, eksploataбилnosti, tehnološkičnosti, normiranosti, ekonomičnosti, estetičnosti te recikličnosti i ekološkičnosti. Svaku skupinu zahtjeva potrebno je analizirati za konkretne radne uvjete potrošnih dijelova građevinske mehanizacije. Prema postavljenim zahtjevima na proizvod, predložiti koja su relevantna svojstva materijala. Izbor najpogodnijeg materijala ili vrste materijala potrebno je potkrijepiti tumačenjima. U redu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

24. 4. 2024.

**2. rok (izvanredni):** 11. 7. 2024.  
**3. rok:** 19. i 20. 9. 2024.

**2. rok (izvanredni):** 15. 7. 2024.  
**3. rok:** 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

*Irena Žmak*  
prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

*Damir Godec*  
prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| SADRŽAJ .....  | 1  |
| POPIS SLIKA .....  | 3  |
| POPIS TABLICA.....   | 4  |
| POPIS OZNAKA .....   | 5  |
| SAŽETAK.....   | 6  |
| SUMMARY .....  | 7  |
| 1. UVOD.....   | 8  |
| 2. BAGERI .....  | 10 |
| 2.1. Osnovna podjela bagera .....  | 10 |
| 2.1.1. Bageri s jednim krakom ili strijelom te s jednom lopatom .....                                    | 10 |
| 2.1.2. Bageri vjedričari.....  | 12 |
| 2.1.3. Bageri bez lopate ili vjedrica .....  | 12 |
| 3. HIDRAULIČNI BAGERI .....  | 14 |
| 3.1. Osnovni dijelovi hidrauličnih bagera .....  | 14 |
| 3.2. Princip rada hidrauličnog bagera .....  | 16 |
| 3.2.1. Hidraulični cilindar .....  | 19 |
| 3.2.2. Hidraulični motor.....  | 20 |
| 3.3. Vrste hidrauličnih bagera .....   | 22 |
| 3.3.1. Hidraulični bageri na kotačima i na gusjenicama .....   | 22 |
| 3.3.2. Podjela hidrauličnih bagera prema masi .....  | 24 |
| 3.3.2.1. Mini bageri.....  | 25 |
| 4. ZAHTJEVI ZA IZBOR MATERIJALA ZA POTROŠNE DIJELOVE BAGERA.....   | 29 |
| 4.1. Kriteriji za izbor materijala zuba na lopati bagera .....   | 29 |
| 4.1.1. Funkcionalnost.....   | 32 |
| 4.1.2. Eksploatabilnost.....   | 33 |
| 4.1.3. Tehnogičnost.....   | 33 |
| 4.1.3.1. Toplinska obrada zubi na lopati bagera .....  | 34 |
| 4.1.3.2. Prevlačenje zubi na lopati bagera .....   | 35 |
| 4.1.4. Normiranost i ekonomičnost.....   | 35 |
| 4.1.5. Estetičnosti.....   | 36 |
| 4.1.6. Recikličnost i ekologičnost .....   | 36 |
| 4.2. Trošenje zubi na lopati bagera .....  | 37 |
| 4.2.1. Procesi trošenja zubi za lopatu bagera .....  | 37 |
| 4.2.1.1. Udarno trošenje.....  | 38 |
| 4.2.1.2. Abrazijsko trošenje .....   | 38 |
| 4.2.1.3. Izjedanje.....  | 38 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO – ODREĐIVANJE KEMIJSKOG SASTAVA<br>ISTROŠENOG I NOVOG ZUBA ZA LOPATU BAGERA ..... | 40 |
| 5.1. Određivanje kemijskog sastava XRF metodom.....  | 41 |
| 5.2. Određivanje kemijskog sastava LIBS metodom .....  | 46 |

---

|   |    |
|---|----|
| 5.3. Izbor materijala zubi za lopatu bagera ..... | 51 |
| 6. ZAKLJUČAK.....                                 | 54 |
| LITERATURA.....                                   | 56 |
| PRILOZI.....                                      | 61 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Osnovne vrste građevinskih strojeva [6] .....  | 8  |
| Slika 2.  | Bager sajlaš pri vađenju šljunka [10] .....  | 11 |
| Slika 3.  | Bager vjedričar s kolom (lijevo) i lancem vjedrica (desno) [11,12] .....                         | 12 |
| Slika 4.  | Ilustracija bagera-sisavca u radu [12].....  | 13 |
| Slika 5.  | Hidraulični bager japanskog proizvođača Hitachi [12].....  | 14 |
| Slika 6.  | Shematski prikaz hidrauličnog bagera [16].....   | 15 |
| Slika 7.  | Shematski prikaz funkcije utega hidrauličnog bagera [17,18] .....                                | 16 |
| Slika 8.  | Tok energije kroz podsustave hidrauličnog bagera [19] .....                                      | 17 |
| Slika 9.  | Shema hidrauličnog sustava [22] .....  | 18 |
| Slika 10. | Prikaz upravljanja hidrauličnog bagera [24] .....  | 19 |
| Slika 11. | Unutrašnjost kabine bagera s pripadajućim upravljačkim uređajima i ostalim dijelovima [25] ..... | 19 |
| Slika 12. | Dijelovi hidrauličnog cilindra [27].....   | 19 |
| Slika 13. | Shema proračuna hidrauličnog cilindra [27] .....   | 20 |
| Slika 14. | Pogonski hidromotor podvozja hidrauličnog bagera [24].....                                       | 21 |
| Slika 15. | Hidromotor za okretanje hidrauličnog bagera [24] .....   | 22 |
| Slika 16. | Struktura elastomernih gusjenica [30].....   | 23 |
| Slika 17. | Prikaz čeličnih (lijevo) i elastomernih (desno) gusjenica [32].....                              | 24 |
| Slika 18. | Specifikacije bagera Kubota KX057-4 [35].....  | 26 |
| Slika 19. | Kubota KX057-4 .....   | 28 |
| Slika 20. | Shematski prikaz nastanka sile kopanja držača lopate [38] .....                                  | 30 |
| Slika 21. | Sila kopanja na lopati [38].....   | 30 |
| Slika 22. | Otpor lopate prilikom kopanja [37].....  | 31 |
| Slika 23. | Različiti oblici zuba za bagere (lijevo) i lopata sa zubima (desno) [39] .....                   | 32 |
| Slika 24. | Graf prosječnih cijena čelika u razdoblju u razdoblju od 2014. do 2024. [45] .....               | 36 |
| Slika 25. | Procesi trošenja zuba za lopatu bagera [39] .....  | 37 |
| Slika 26. | Mikrogibanja na zubu lopate bagera [39].....   | 39 |
| Slika 27. | Uzorci korišteni za eksperimentalni dio .....  | 40 |
| Slika 28. | Tijek ispitivanja uzorka 1 XRF metodom .....   | 43 |
| Slika 29. | Tijek ispitivanja uzorka 1 XRF metodom .....   | 43 |
| Slika 30. | Tijek ispitivanja uzorka 2 XRF metodom .....   | 44 |
| Slika 31. | Uzorci za provjeru ispravnosti LIBS uređaja .....  | 47 |
| Slika 32. | Tijek ispitivanja uzorka 1 LIBS metodom .....  | 48 |
| Slika 33. | Tijek ispitivanja uzorka 2 LIBS metodom .....  | 48 |
| Slika 34. | Trag LIBS ispitivanja na uzorku .....  | 49 |
| Slika 35. | Presjek vrha zuba za lopatu bagera lokalno ojačanog keramičkim česticama [54] .....              | 53 |



**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Osnovne vrste građevinske mehanizacije s odgovarajućim radnim priključcima i primjenama [3–5] ..... | 9  |
| Tablica 2. Vrste lopata kod bagera lopatara [5,7,9] .....  | 11 |
| Tablica 3. Specifikacije bagera Kubota KX057-4 [35] .....  | 26 |
| Tablica 4. Tehničke specifikacije uređaja XRF X-MET 8000 [47] .....  | 41 |
| Tablica 5. Kemijski sastav dobiven XRF metodom za uzorak 1 .....   | 44 |
| Tablica 6. Kemijski sastav dobiven XRF metodom za uzorak 2 .....   | 45 |
| Tablica 7. Tehničke specifikacije uređaja Z-903 Carbon [48] .....  | 46 |
| Tablica 8. Kemijski sastav dobiven LIBS metodom za uzorak 1 .....  | 49 |
| Tablica 9. Kemijski sastav dobiven LIBS metodom za uzorak 2 .....  | 50 |
| Tablica 10. Mehanička svojstva niskolegiranog čelika za zube za lopatu bagera [49,50] .....                    | 51 |
| Tablica 11. Kemijski sastav Hardox Extreme čelika [51] .....   | 51 |
| Tablica 12. Mehanička svojstva Hardox Extreme čelika [51] .....  | 52 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica       | Opis  |
|--------|----------------|---|
| $A$    | mm             | Udaljenost između cilindra ruke i spoja ruke i grane bagera           |
| $B$    | mm             | Udaljenost između vrha zuba lopate bagera i spoja ruke i grane bagera |
| $c$    | mm             | Dimenzija cilindra i držača lopate                                    |
| $C_1$  | —              | Pogonski hidromotor   |
| $C_2$  | —              | Hidromotor okretanja kupole   |
| $C_3$  | —              | Hidraulični cilindar lopate   |
| $C_4$  | —              | Hidraulični cilindar ruke   |
| $C_5$  | —              | Hidraulični cilindar grane  |
| $D$    | mm             | Promjer cilindra  |
| $d$    | mm             | Dimenzija cilindra i držača lopate                                    |
| $d_c$  | mm             | Promjer klipnjače   |
| $e$    | mm             | Dimenzija cilindra i držača lopate                                    |
| $F$    | N              | Sila opterećenja klipnjače  |
| $F_1$  | N              | Sila cilindra lopate  |
| $F_A$  | N              | Aktivna sila tlaka u hidrauličnome cilindru                           |
| $F_R$  | N              | Reaktivna sila tlaka u hidrauličnome cilindru                         |
| $F_s$  | N              | Sila cilindra ruke  |
| $H$    | mm             | Pomak klipa   |
| $L$    | N              | Sila kopanja na lopati  |
| $p_1$  | MPa            | Nominalni tlak za aktivnu silu u hidrauličnom cilindru                |
| $p_2$  | MPa            | Nominalni tlak za reaktivnu silu u hidrauličnom cilindru              |
| $r$    | mm             | Dimenzija cilindra i držača lopate                                    |
| $R_x$  | N              | Sila kopanja držača lopate (ruke bagera)                              |
| $V$    | m <sup>3</sup> | Volumen hidrauličnog cilindra   |

## SAŽETAK

U početnom dijelu ovog završnog rada nabrojane su i opisane funkcije postojećih osnovnih vrsta građevinske mehanizacije. Kao najvažniji građevinski stroj istaknut je bager, te su opisane sve vrste i podvrste bagera. Detaljno su opisani dijelovi, princip rada, opterećenje i uvjeti rada hidrauličnih bagera, koji su najvažnija vrsta bagera zbog svoje široke primjene i mnogobrojnih funkcija.

Analizirani su zahtjevi pri izboru materijala za zube koji se nalaze na lopati bagera. Za odabrani potrošni dio bagera provedena je analiza kroz osnovne skupine kriterija za izbor materijala prilikom razvoj proizvoda, te su utvrđena potrebna svojstva koja se nameću na odabrani materijal.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje kemijskog sastava jednog novog i jednog potrošenog zuba lopate rendgenskom fluorescencijskom spektroskopijom (XRF metoda) i laserski induciranom probojnom spektroskopijom (LIBS metoda). Dobivenim rezultatima utvrđeno je da su zubi izrađeni od niskolegiranog čelika sa srednjim ili niskim sadržajem ugljika. Niskolegirani čelik posjeduje svojstva kojima zadovoljava nametnute zahtjeve, stoga je dovoljno prikladan, a ekonomičan izbor materijala.

Ključne riječi: građevinska mehanizacija, hidraulični bager, zubi za lopatu bagera, izbor materijala, rendgenskom fluorescencijskom spektroskopija, laserski inducirana probojna spektroskopija

## **SUMMARY**

In the introductory part of this Bachelor thesis, the functions of various basic types of construction machinery are outlined and described. The excavator is highlighted as the most important construction machine, with a detailed description of its types and subtypes. The Bachelor thesis thoroughly explains the components, working principle, loads and operating conditions of hydraulic excavators, which are the most important type of excavator due to their wide application and numerous functions.

The requirements for selecting materials for the teeth of the excavator bucket are analyzed. An analysis was performed on a chosen wearable part of the excavator through basic groups of criteria used for material selection during product development, and the necessary properties for the chosen material were determined.

In the experimental part of the work, the chemical composition of one new, and one used bucket tooth was examined using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). The results revealed that the teeth are made from low-alloy steel with medium or low carbon content. Low-alloy steel possesses the properties required to meet the imposed demands, making it a sufficiently suitable and economical material choice.

**Keywords:** construction machinery, hydraulic excavator, excavator bucket teeth, material selection, X-ray fluorescence spectroscopy, laser-induced breakdown spectroscopy

## 1. UVOD

Pojam građevinske mehanizacije obuhvaća sve strojeve koji zamjenjuju ljudski rad, a pritom ubrzavaju, olakšavaju, poboljšavaju i u konačnici smanjuju cijenu obavljenoga posla na gradilištu. Također osiguravaju neometano izvođenje radova u sigurnoj okolini na mjestima gdje često i nije moguć ručni rad čovjeka [1]. Karakteristični poslovi za koje se upotrebljavaju građevinski strojevi su najčešće vezani uz zemljane radove, no mogu biti vezani i uz radove koji prethode izvođenju asfaltnih i betonskih radova. Koriste se i za čišćenja i krčenja terena, kao i za razbijanje, odnosno usitnjavanje, stijenskih i kamenih tla. Tipični poslovi koje obavljaju građevinski strojevi su iskopi, ravnanja tla i materijala, utovar različitih vrsta rasutih materijala, te dizanje i spuštanje tereta različitih masa. Svaki stroj ima predodređenu funkciju i svrhu za koju se upotrebljava, no nerijedak je slučaj da jedan stroj obavlja više funkcija ukoliko ima mogućnost. Iako su strojevi na prvi pogled vrlo različiti i služe za obavljanje različitog posla, osnovni princip konstruiranja im je sličan. Osnovne komponente koje čine svaki stroj prema [2] su:

- električni motor ili motor s unutarnjim izgaranjem
- prijenosni sustav
- sustav hidraulike
- upravljački sustav
- radni priključci poput hidrauličnog čekića, lopate, noža i drugi.

Osnovne vrste građevinskih strojeva koji se najviše primjenjuju u niskogradnji su bageri, utovarivači, bager-utovarivač (poznatiji pod nazivom „kombinirka“), grejderi, dozeri i strojevi za nabijanje tla [Slika 1] [3–5].



Slika 1. Osnovne vrste građevinskih strojeva [6]

U [Tablica 1] prikazane su osnovne vrste građevinskih strojeva s odgovarajućim funkcijama i poslovima koje obavljaju na gradilištu, kao i raznim radnim priključcima koje je moguće koristiti na tim strojevima. Bez primjene odgovarajućeg priključka na stroju nije moguće niti obavljanje odgovarajućeg posla na gradilištu. Osim toga, upotrebom odgovarajućeg radnog priključka dolazi do uštede vremena, povećanja radne efikasnosti stroja i manjeg izlaganja stroja opterećenju [6].

**Tablica 1. Osnovne vrste građevinske mehanizacije s odgovarajućim radnim priključcima i primjenama [3–5]**

| <b>osnovna vrsta građevinske mehanizacije</b> | <b>radni priključci</b>   | <b>primjena</b>  |
|---|---|--|
| bager   | lopata, škare, hidraulični čekić, vilice, ripper, grajfer, hidraulični magnet, svrdlo i mnogi drugi | iskopi, utovar rasutih materijala, rušenje, bušenje rupa, odvajanje materijala, ravnanje materijala, podizanje tereta, istovar tereta, razbijanje i usitnjavanje tvrdih materijala |
| „dozer“                                       | nož, lopata, ripper   | guranje materija, ravnanje tla i materijala, razbijanje tla  |
| „grejder“                                     | nož   | ravnanje terena i materijala   |
| utovarivač                                    | utovarna lopata   | utovar rasutih materijala  |
| bager-utovarivač                              | lopata, utovarna lopata, vilice, miješalica za beton, svrdlo, hidraulični čekić                     | utovar rasutih materijala, manji iskopi, miješanje betona, bušenje manjih rupa, razbijanje i usitnjavanje materijala   |
| strojevi za nabijanje tla                     | valjci, ploče za nabijanje  | nabijanje tla i materijala do tražene zbijenosti   |

Prema dobivenim informacijama iz [Tablica 1] vidljivo je da najviše radnih priključaka postoji za bager, te je prema tome vrlo lako donijeti zaključak da bager kao radni stroj ima najviše mogućih primjena na gradilištu i općenito u niskogradnji. Upravo je zbog toga kao tema za ovaj završni rad izabran izbor materijala za potrošni dio građevinske mehanizacije, specifičnije za dio koji se nalazi na radnom priključku bagera, a to su zubi na lopati bager.

## 2. BAGERI

Bageri (njem. *Bagger*, od *baggeren*; jaružati) su strojevi čija je primarna svrha iskop, prebacivanje i utovar zemlje, kamenog agregata, šljunka i pijeska ili iskop i utovar ugljena i različitih vrsta ruda u eksploatacijskim poljima. Jednostavnija definicija bi bila da su bageri strojevi koji se najviše koriste u gradnji, proizvodnji i eksploataciji građevinskog materijala i različitih vrsta ruda. Najčešća i najrasprostranija primjena je u građevinarstvu (područje niskogradnje), zatim u rudarstvu, a u manjoj mjeri u šumarstvu, poljoprivredi te skladištenju robe. Stoga se često u definicijama koristi termin univerzalni radni stroj. Univerzalnost bagera također je prisutna i u građevini, gdje bager mijenjanjem svojih radnih priključaka može imati vrlo veliki broj primjena, što je vidljivo iz [Tablica 1]. Povijesno gledano, začeci koncepta bagera započinju u 16. stoljeću, dok šira primjena započinje izumom parnoga stroja. Kroz integraciju s drugim tehnologijama bager je danas vrlo impresivan i napredan stroj što se očituje kroz njegovu primjenu u različitim djelatnostima. Zanimljiv podatak je da najveći bager današnjice, američkog proizvođača Caterpillara, ima masu od čak 1102 tone s utovarnom lopatom kapaciteta 52 m<sup>3</sup> te se primjenjuje u rudarstvu [5,7,8].

### 2.1. Osnovna podjela bagera

Uzevši u obzir univerzalnost i vrlo široko područje primjene bagera, postoje razne vrste i podvrste bagera. Iako se dijele na više načina, osnovna je podjela na:

- a) bageri s jednim krakom ili strijelom te s jednom lopatom (vrlo često se koristi i naziv građevinski bageri) [Slika 2]
- b) bageri s više lopata u obliku vjedrica (bageri vjedričari) [Slika 3]
- c) bageri bez lopata ili vjedrica [Slika 4] [5].

#### 2.1.1. Bageri s jednim krakom ili strijelom te s jednom lopatom

Bageri s jednim krakom ili strijelom te s jednom lopatom standardna su i najpoznatija vrsta bagera, za koju se često primjenjuje i naziv građevinski bageri s obzirom da se najčešće upotrebljavaju u građevinarstvu. Prema vrsti lopate koju koriste razlikuju se bageri lopatari i bageri s povlačnom košarom. Bageri lopatari se također mogu podijeliti s obzirom na koju vrstu lopate koriste [Tablica 2] [5,7,9].

Tablica 2. Vrste lopata kod bagera lopatara [5,7,9]

| Vrsta lopate              | Primjena                             |
|---------------------------|--------------------------------------|
| dubinska lopata           | iskop temelja, kanala                |
| utovarna lopata           | utovar rasutih materijala i agregata |
| zahvatna lopata (grajfer) | iskop i vađenje materijala iz vode   |

Osim prema vrsti lopate koju koriste, ova kategorija bagera može se podijeliti i prema prijenosu pogonske energije na radni dio, odnosno na mehaničke bagere (sajlaše) [Slika 2] i hidraulične bagere (standardni građevinski bageri) [Slika 5]. Kod mehaničkih bagera gibanje kraka se ostvaruje preko sustava čeličnih užadi („sajli“) i kolotura. Mehanički bageri dijele se u dvije skupine. Prva skupina se naziva bageri sajlaši [Slika 2] koji imaju karakterističnu nepromjenjivu rešetkastu strijelu. Osnovna podjela bagera sajlaša temelji se na vrsti radnog priključka koji koriste, te prema tome razlikujemo bagere sajlaše sa zahvatnom lopatom (grajferi) i bagere sajlaše s povlačnom košarom (skrejperi). Bageri sajlaši se ponajviše koriste pri iskopu i vađenju šljunka odnosno pijeska iz vodenih površina i u nešto manjoj mjeri prilikom izrade glineno-betonskih zavjesa ili zidova u tlu. Drugoj skupini pripadaju mehanički bageri s dvodijelnim zglobovno vezanim krakom, a kao radni priključak se najčešće koristi utovarna lopata. Primarna namjena im je za rudarstvo, odnosno pri eksploataciji različitih vrsta ruda [5].



Slika 2. Bager sajlaš pri vađenju šljunka [10]



Za razliku od mehaničkih bagera, kod hidrauličnih bagera se pomicanje kraka i ostalih dijelova bagera ostvaruje se preko hidrauličnog tlaka [7]. Detaljniji opis hidrauličnih bagera dostupan je u sljedećem poglavlju.

### 2.1.2. *Bageri vjedričari*

Bageri vjedričari, kako i sam naziv govori, sastoje se od više lopata u obliku vjedrica, što im omogućuje neprekidan iskop zemlje, vađenje šljunka iz vodenih površina ili iskop kanala. Vjedrice mogu biti povezane putem lanca koji putuje duž kraka, a staza lanca je vezana na podvozje bagera. Nosač vjedrica učvršćuje se zglobno s bočne strane bagera, te je obješen pomoću čeličnog užeta koja je čvrsto vezana na rešetkastu ruku bagera. Drugi način povezivanja vjedrica je u kolo (rotor), te im je glavna karakteristika visoka učinkovitost zbog koje se upotrebljavaju u rudnicima. Bageri vjedričari se dijele na dvije podskupine prema načinu povezivanja vjedrica, odnosno na bagere vjedričare s lancem vjedrica [Slika 3 (desno)] i bagere vjedričare s kolom vjedrica [Slika 3 (lijevo)] [5,7,9].



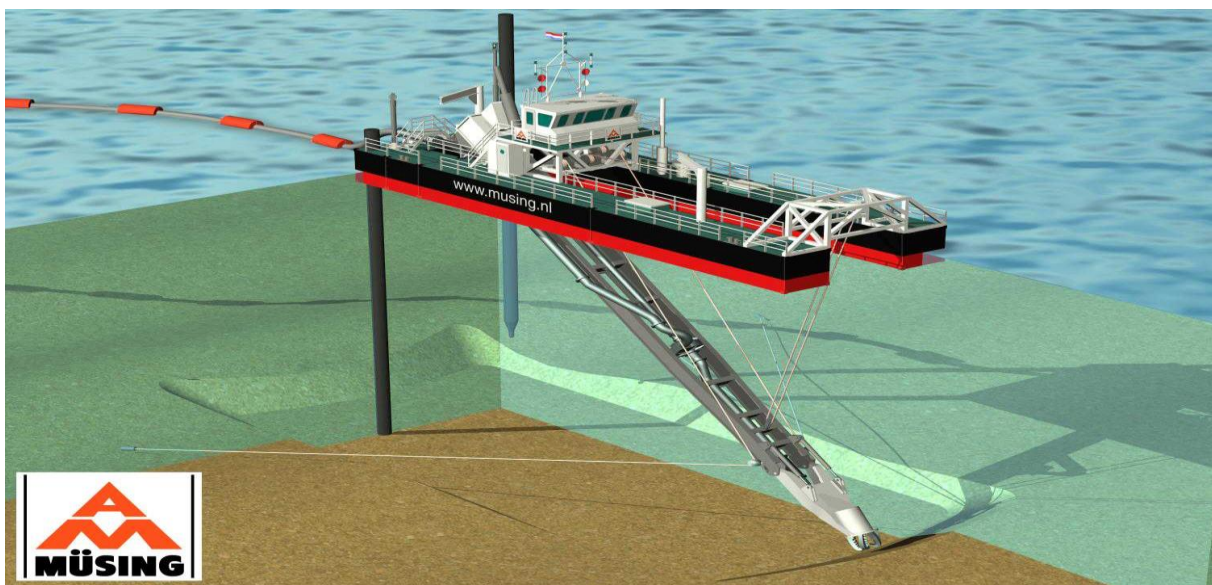
**Slika 3. Bager vjedričar s kolom (lijevo) i lancem vjedrica (desno) [11,12]**

U ovu skupinu bagera svrstavaju se i rovokopači koji su specijalizirani za kopanje uskih i dubokih rovova, te posebna vrsta rovokopača koji se nazivaju drenopolagači. Drenopolagači istodobno s iskopom uskog rova polažu i zatrpavaju drenažne cijevi što je omogućeno specifičnom konstrukcijom i opremom koja se sastoji od kraka s lancem manjih poluotvorenih vjedrica sličnim zubima, opreme za nošenje i polaganje cijevi, te noža za zatrpavanje rovova [5,7].

### 2.1.3. *Bageri bez lopate ili vjedrica*

U posljednju osnovnu skupinu bagera svrstavaju se bageri bez lopate ili vjedrica, a njihovo funkcioniranje omogućeno je različitim principima tehnologija. Najpoznatiji predstavnik ove

skupine je bager sisavac („refuler“), vrsta plovnog bagera, koji je konstruiran s ciljem vađenja kamenih materijala s dna jezera ili rijeka. Spuštanjem iskopne rotirajuće glave na dno i njezinim uključivanjem dolazi do mekšanja tla. Nakon toga dolazi do usisavanja uz pomoć cijevi koja se nalazi na iskopnoj rotirajućoj glavi. Princip rada usisavanja temelji se na stvaranju podtlaka u posebno oblikovanom usisnom dijelu cijevi. Važnu ulogu u funkcioniranju cijeloga sustava ima kompresor. Iskopavanje se provodi na način da se kameno tlo s vodom usisava do površine. Na površini dolazi do istjecanja vode, a kameno tlo se putem plovećih cjevovoda odvodi do kopna na daljnje sortiranje [11]. U ovu skupinu se mogu svrstati i neke vrste rovokopača, međutim oni zauzimaju mjesto u ovoj vrsti bagera u vrlo malom udjelu [5].



Slika 4. Ilustracija bagera-sisavca u radu [12]

### 3. HIDRAULIČNI BAGERI

Kroz ovo poglavlje obradit će se jedna od podvrsta bagera s jednim krakom ili strijelom te jednom lopatom. Iako je do sad spomenuto više različitih vrsta bagera i njihove razne podvrste, hidraulični bageri su skupina koja zaslužuje detaljniji opis i upoznavanje s njihovim radom. Osnovne karakteristike hidrauličnih bagera poput kompaktnosti, omjera snage i veličine, brzine, produktivnosti te postojanje raznih podvrsta hidrauličnih bagera omogućavaju njihovu primjenu u raznim situacijama. Ako se uzmu u obzir i razni dostupni radni priključci [Tablica 1] sa sigurnošću se može tvrditi da su hidraulični bageri najpopularnija i najkorištenija vrsta ne samo među ostalim vrstama bagera, već i među ostalim vrstama građevinskih strojeva [Slika 5].

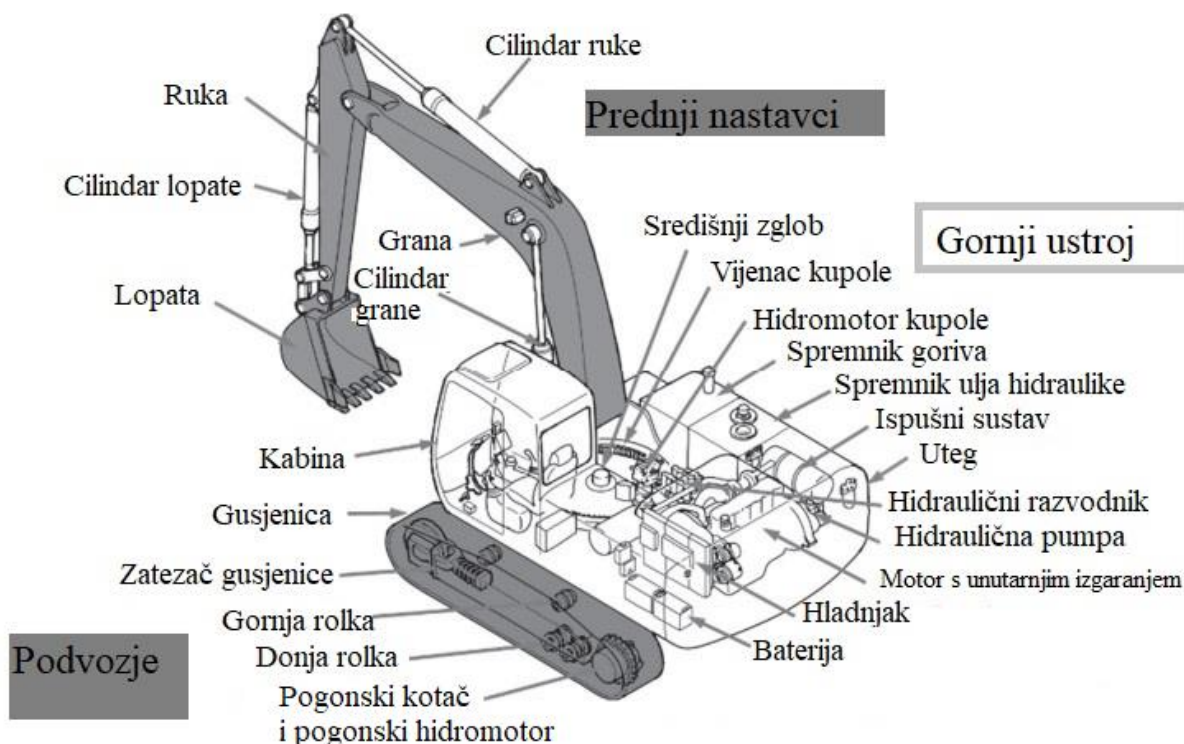


Slika 5. Hidraulični bager japanskog proizvođača Hitachi [12]

#### 3.1. Osnovni dijelovi hidrauličnih bagera

Iako postoji više vrsta i podvrsta hidrauličnih bagera, generalno se svi sastoje od tri osnovne cjeline: podvozja, gornjeg ustroja i prednjeg nastavka [Slika 6]. Glavna funkcija prve cjeline, podvozja hidrauličnog bagera, jest omogućavanje neometanog kretanja bagera naprijed ili nazad. Kretanje kod hidrauličnog bagera ostvaruje se preko gusjenica ili preko kotača. Kod bagera gusjeničara podvozje se sastoji od pogonskog hidromotora, gornjih i donjih valjaka („rolki“), vodećeg kotača, opruge koja ima funkciju zatezača gusjenice i pogonskog kotača (lančanika). Uloga pogonskog hidromotora je pretvaranje dobivene hidraulične snage u mehaničku snagu, odnosno pretvara snagu u moment i tako pokreće gusjenice. Pogonski zupčanik nalazi se na pogonskom hidromotoru, te osigurava pravilan prijenos snage s

pogonskog reduktora na gusjenice bagera. Valjci osiguravaju ravnomjernu raspodjelu težine bagera i dovoljnu napetost gusjenica. Premala napetost gusjenica predstavlja rizik od iskakanja gusjenica, dok prevelika napetost dovodi do bržeg trošenja gusjenica, stoga je bitno postići optimalnu napetost gusjenica. Uloga vodećeg kotača jest usmjeravanje i osiguravanje neometanog i glatkog okretanja gusjenica [Slika 6] [13–16].



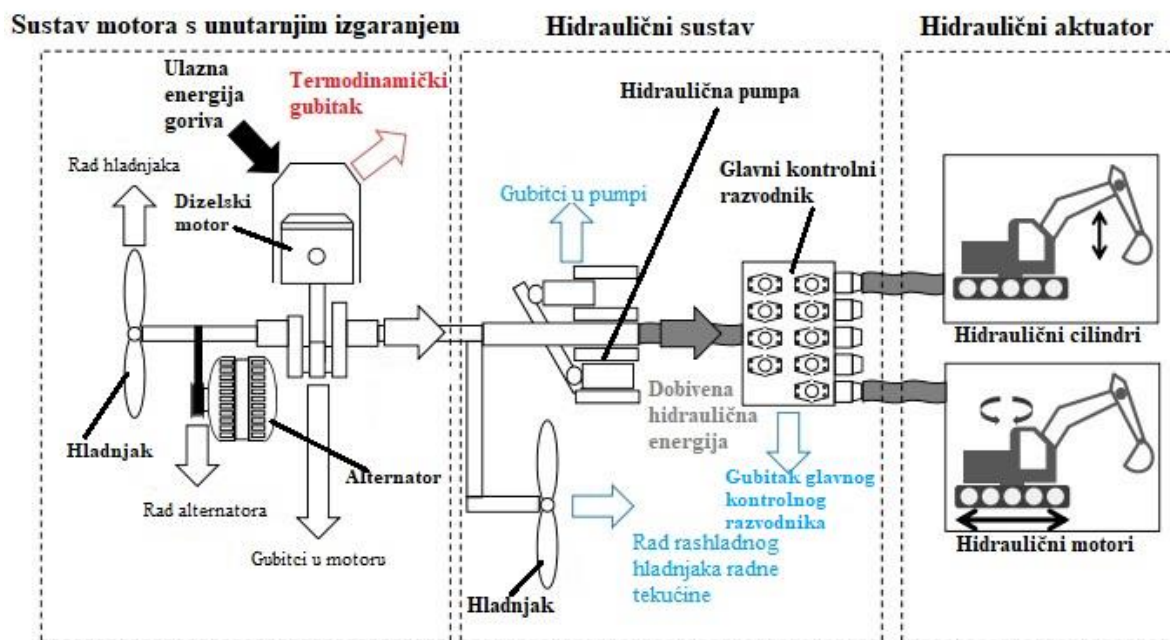
Slika 6. Shematski prikaz hidrauličnog bagera [16]

Kod gornjeg ustroja, bitniji dijelovi su kabina, motor s unutarnjim izgaranjem, hidromotor kupole, uteg te hidraulični razvodnik zajedno s hidrauličnom pumpom. Kabina je mjesto iz kojeg se upravlja hidrauličnim bagerom, putem komandi koje ovise o vrsti bagera i koje su u potpunosti prilagođene osposobljenom rukovatelju građevinskih strojeva (koji je još uvijek nezamjenjiv) te sama učinkovitost i rad bagera uvelike ovisi o sposobnostima osposobljenog rukovoditelja, stoga je bitno da kabina bude u potpunosti prilagođena, optimizirana i ergonomična. Motor s unutarnjih izgaranjem djeluje kao glavni izvor snage. Još uvijek su u upotrebi najčešće motori pogonjeni dizelskim gorivom, iako se tehnologija razvija u smjeru električnih bagera. Za stabilnost i balans kod hidrauličnog bagera koristi se uteg, postavljen na stražnjoj strani bagera. Funkcija utega jest da spriječi prevrtanje bagera uslijed djelovanja



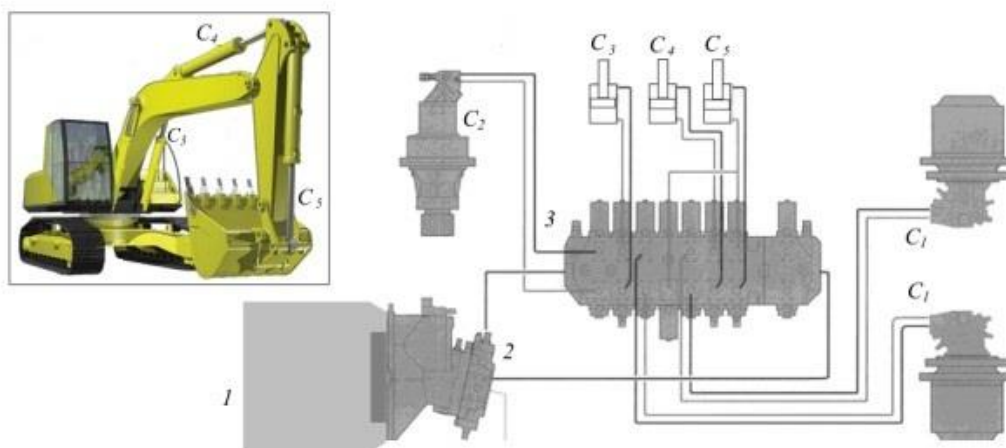
radi zasebno, međutim za pravilno funkcioniranje hidrauličnog bagera kao cjeline potrebno je međudjelovanje svih sustava, te se može povući paralela između ljudskog tijela i hidrauličnog bagera jer je ljudsko tijelo kompleksan sustav sastavljen od više funkcionalnih podsustava. Tri osnovna podsustava kod hidrauličnog bagera su [Slika 8]:

- a) sustav motora s unutarnjim izgaranjem
- b) hidraulični sustav
- c) hidraulični aktuator.



Slika 8. Tok energije kroz podsustave hidrauličnog bagera [19]

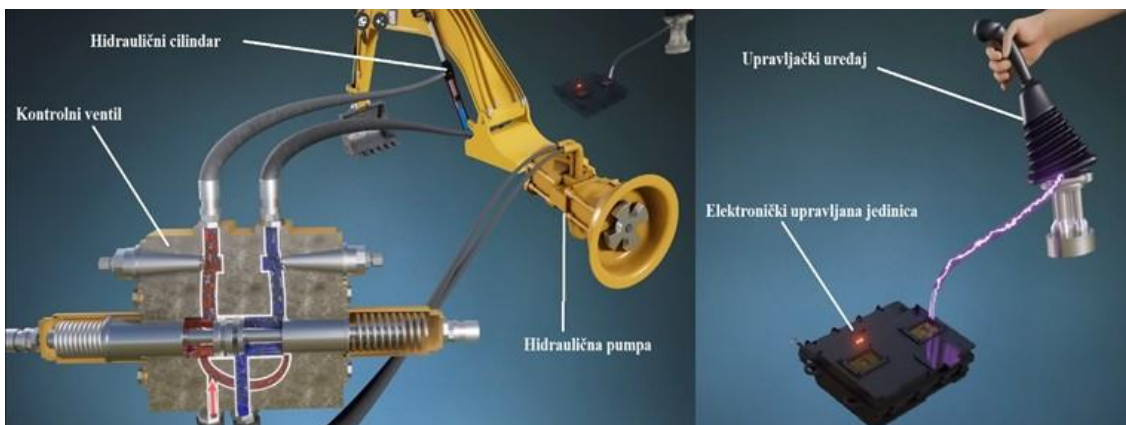
Kao što je vidljivo na [Slika 8], ulazna energija dobivena iz dizelskog goriva pretvara se u mehaničku energiju u motoru s unutarnjim izgaranjem te se uz određene gubitke prenosi do hidrauličnog sustava. Mehanička energija potom se pretvara u hidrauličnu uslijed rotacijskog gibanja prijenosne osovine i pokretanja hidraulične pumpe, jezgre hidrauličnog sustava. Hidraulična energija sadržana je u hidrauličnom ulju koje prolazi kroz glavni kontrolni razvodnik kojim se energija sustava prenosi do hidrauličnih cilindara i hidrauličnih motora, gdje se u konačnici pretvara u mehaničku energiju potrebnu za obavljanje raznih poslova [19–21].



**Slika 9. Shema hidrauličnog sustava [22]**

Definicija hidrauličnog aktuatora jest da je to uređaj koji pretvara energiju tlaka ulja u mehaničku energiju, kako bi se ostvarilo rotacijsko, linearno ili oscilacijsko gibanje [20,23]. Shema hidrauličnog sustava, prikazana na [Slika 9], prikazuje da postoji više hidrauličnih aktuatora: pogonski hidromotori (oznaka  $C_1$  na slici), zatim hidromotor okretanja kupole (oznaka  $C_2$ ) te hidraulični cilindri lopate ( $C_5$ ), ruke ( $C_4$ ) i grane ( $C_3$ ). Oni se pogone preko glavnog hidrauličnog razvodnika (označenog brojem 3 na slici), koji se pogoni preko hidraulične pumpe (označene brojem 2), koju pak pogoni dizelski motor (označen brojem 1), kao što je već ranije spomenuto [22].

U praksi pomicanje grane prema gore ili dolje započinje unutar upravljačke kabine. Osposobljeni rukovatelj građevinskih strojeva pomicanjem upravljačkog uređaja (engl. *Joystick*) šalje signal u elektroničku upravljačku jedinicu (engl. *Electronic Control Unit*) koja se ponaša kao „mozak“ hidrauličnog bagera, te ima zadatak da dovede hidraulično ulje iz hidraulične pumpe do hidrauličnog cilindra grane, no prije nego li ulje dođe do cilindra, mora proći kroz ventil, koji ovisno o tome pomiče li se grana gore ili dolje, odvodi ili dovodi ulje visokog tlaka te isto tako odvodi ili dovodi ulje niskog tlaka iz hidrauličnog cilindra. Na [Slika 10] je konkretno prikazan primjer dizanja grane prema gore, gdje se u cilindar dovodi hidraulično ulje pod visokim tlakom, a odvodi hidraulično ulje pod niskim tlakom. Ulje putuje hidrauličnim crijevima kroz sistem hidrauličnog bagera [24].



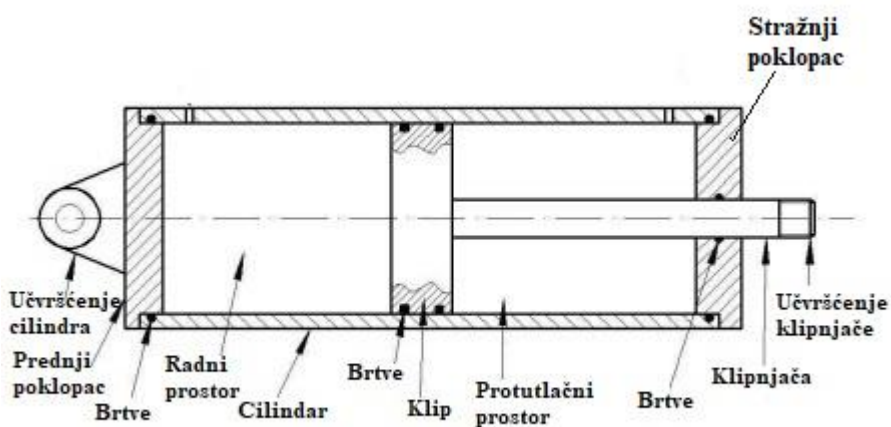
Slika 10. Prikaz upravljanja hidrauličnog bagera [24]



Slika 11. Unutrašnjost kabine bagera s pripadajućim upravljačkim uređajima i ostalim dijelovima [25]

### 3.2.1. Hidraulični cilindar

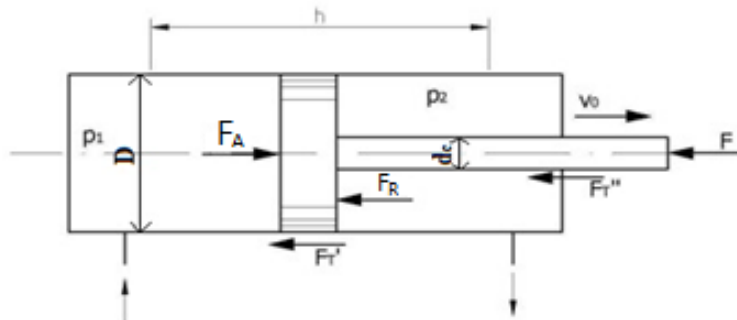
Hidraulični cilindar se definira kao hidraulični akuator čija je funkcija da pretvara energiju tlaka ulja u mehaničku energiju koja omogućava gibanje [26]. Osnovni dijelovi hidrauličnog cilindra prema su prikazani na [Slika 12].



Slika 12. Dijelovi hidrauličnog cilindra [27]



Osnovni proračun hidrauličnog cilindra temelji se na [Slika 13].



Slika 13. Shema proračuna hidrauličnog cilindra [27]

Iz navedene sheme, moguće je izvesti jednadžbe za neke od osnovnih parametara hidrauličnog cilindra.

Aktivna sila tlaka u hidrauličnom cilindru:

$$F_A = p_1 \frac{D^2 \pi}{4} \quad (1)$$

gdje je  $p_1$  – nominalni tlak, a  $D$  – promjer cilindra.

Za reaktivnu silu tlaka u hidrauličnom cilindru vrijedi:

$$F_R = p_2 (D^2 - d_c^2) \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

gdje je  $p_2$  – nominalni tlak, a  $d_c$  – promjer klipnjače.

Optimalan iznos promjera cilindra  $D$  dobiva se iz izraza:

$$D = \sqrt{\frac{4 F}{p_1 \pi}} \quad (3)$$

gdje je  $F$  – sila kojom je opterećena klipnjača.

Posljednji izraz odnosi se na radni volumen hidrauličnog cilindra, a on glasi:

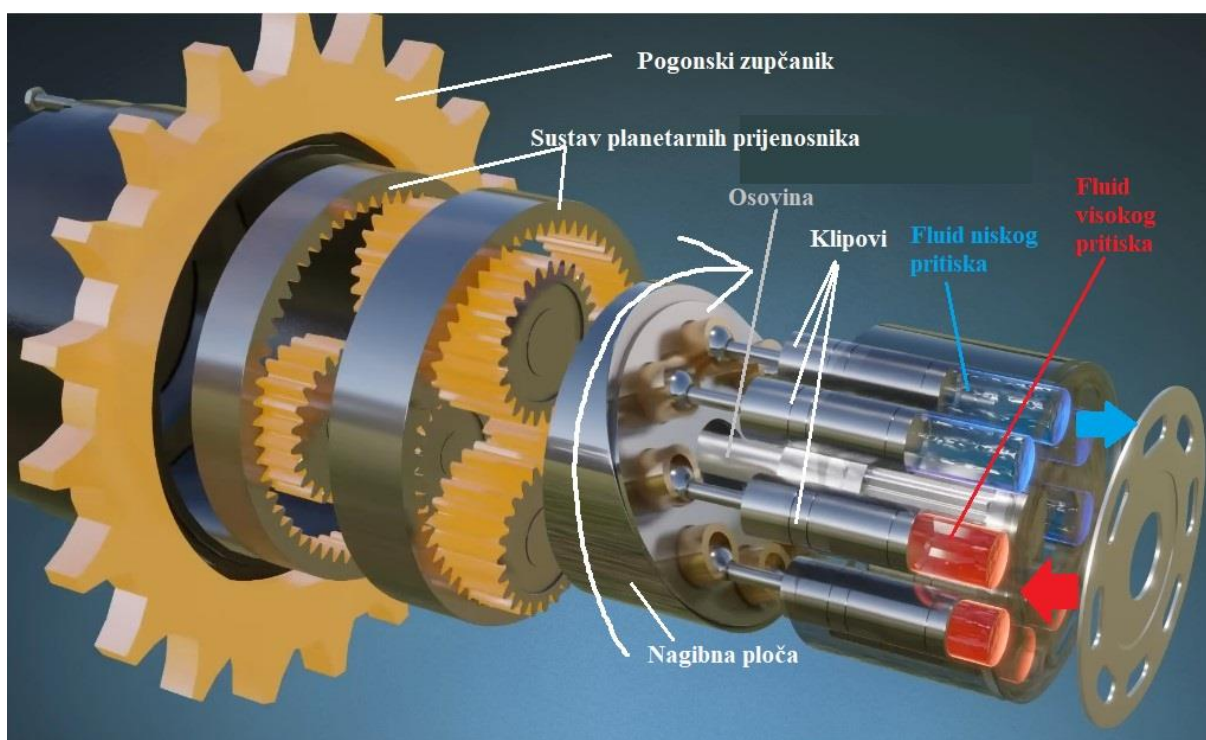
$$V = h \frac{D^2 \pi}{4} \quad (4)$$

gdje je  $h$  – pomak klipa.

### 3.2.2. Hidraulični motor

Definicija hidrauličnog motora jest da je to aktuator čija je primarna funkcija pretvaranje hidraulične energije ulja u mehaničku energiju potrebnu za ostvarivanje gibanja i drugih funkcija. Definicija je potpuno identična definiciji hidrauličnog cilindra, što je zapravo i točno s obzirom da su to hidraulični aktuatori koji imaju istu funkciju, no konstrukcijski gledano oni

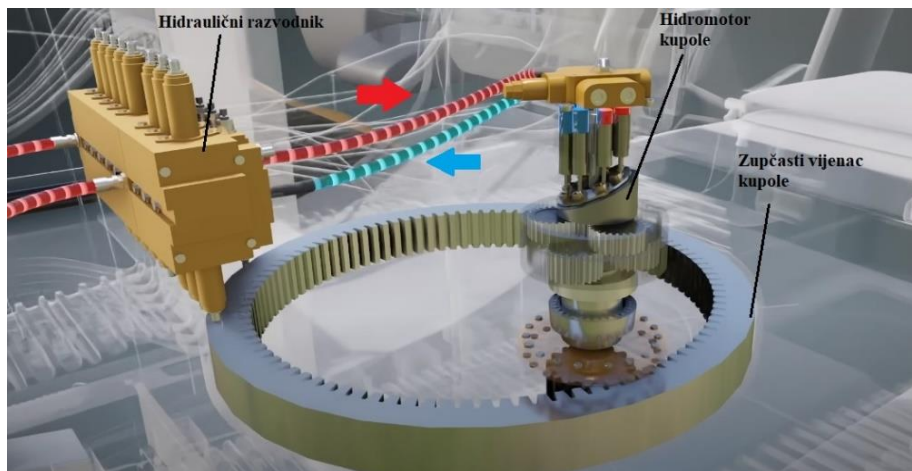
su vrlo različiti. Kod hidrauličnih bagera prisutna su dva tipa hidrauličnih motora. Prvi tip je pogonski hidromotor, čija je primarna funkcija pokretanje gusjenica, odnosno omogućavanje kretanja hidrauličnog bagera. Princip rada hidrauličnog motora temelji se na fluidu visokog tlaka (hidrauličnome ulju) koje dolazi iz hidraulične pumpe smještene u gornjem ustroju hidrauličnoga bagera. Fluid visokog tlaka pokušava gurati klipove unutar hidrauličnog motora lijevo, dok fluid niskog tlaka pokušava gurati klipove desno, no niti jedno od tih gibanja nije moguće ukoliko se nagibna ploča ne rotira. Rotacijom nagibne ploče omogućava se gibanje klipova, te se to rotacijsko gibanje prenosi do mjenjačke kutije, sastavljene od sklopa planetarnih zupčanika, koja prenosi to gibanje do pogonskog zupčanika, te se tako ostvaruje pokretanje gusjenica. Ovaj princip gibanja, kao i svi nabrojani dijelovi hidromotora, vidljivi su na [Slika 14]. Obje gusjenice hidrauličnoga bagera pogoni po jedan neovisan hidromotor [24].



**Slika 14. Pogonski hidromotor podvozja hidrauličnog bagera [24]**

Osim pogonskog motora, kod hidrauličnih bagera vrlo je bitan hidromotor kupole [Slika 15]. Motor kupole jest hidraulični motor koji formira prikladnu silu potrebnu za okretanje bagera lijevo ili desno, koristeći tlak fluida dobivenog iz hidraulične pumpe [28]. Prilikom okretanja hidrauličnog bagera, okreću se samo gornji ustroj i prednji nastavci, dok podvozje ostaje fiksno. Preko hidrauličnog razvodnika dovodi se fluid visokog pritiska koji dolazi iz hidraulične pumpe, a odvodi se fluid niskog pritiska, te na taj način dolazi do pokretanja hidromotora

kupole, koji se giba po takozvanom zupčastom vijencu kupole, te na taj način omogućava okretanje hidrauličnog bagera za 360 stupnjeva [Slika 15] [24].



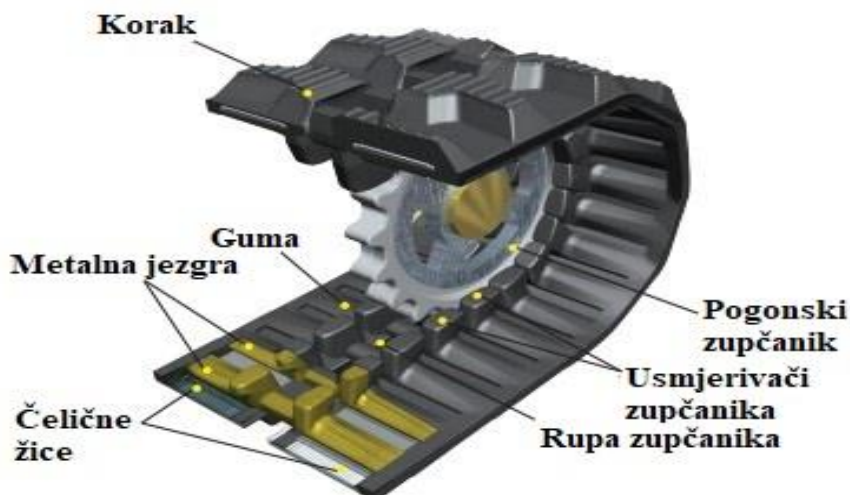
**Slika 15. Hidromotor za okretanje hidrauličnog bagera [24]**

### 3.3. Vrste hidrauličnih bagera

Zbog svoje izuzetno velike i široke upotrebljivosti, hidraulični bageri se proizvode u više vrsta, ovisno o funkciji i poslu koji trebaju obaviti, s ciljem povećanja produktivnosti, smanjenja vremena rada i povećanja produktivnosti obavljenoga posla. Svjetski proizvođači bagera poput Hitachija, Kubote, Caterpillara, Bobcata i drugih često proizvode sve vrste hidrauličnih bagera, te konstantno pokušavaju unaprijediti postojeće vrste bagera novim tehnologijama, kako bi povećali svoju konkurentnost na tržištu. U nastavku će se obraditi osnovne vrste hidrauličnih bagera i njihove podjele.

#### 3.3.1. Hidraulični bageri na kotačima i na gusjenicama

Prva osnovna podjela hidrauličnih bagera je prema načinu njihova kretanja, odnosno podjela na bagere na kotačima i bagere na gusjenicama. Princip kretanja bagera gusjeničara temelji se na radu pogonskih hidromotora koje pokreće hidraulična pumpa, te je taj princip detaljnije opisan u [3.2.2]. Osim hidromotora, podvozje bagera čine i drugi dijelovi: gusjenice, zatezači gusjenice te valjci (gornji i donji). Svaki hidraulični bager ima dvije gusjenice, čije je upravljanje moguće neovisno jedne o drugoj. Gusjenice mogu biti čelične ili elastomerne [Slika 17]. Čelične gusjenice su najčešće napravljene od čelika koji je toplo valjan [29]. Elastomerne gusjenice nastaju kombinacijom prirodnog i sintetskog kaučuka uz dodatke, čime se dobiva dobra otpornost na trošenje, kao i smanjenje buke i vibracija. Metalna matrica se veže na pogonski zupčanik i na taj način sprječava ispadanje elastomerne gusjenice. Dodatna čvrstoća elastomernih gusjenica postiže se ojačanjem čeličnim žicama [Slika 16] [30].



Slika 16. Struktura elastomernih gusjenica [30]

Prednosti upotrebe elastomernih gusjenica nad čeličnima su: manje održavanje, manja buka prilikom kretanja, manje vibracije zbog veće fleksibilnosti, bolja distribucija mase na mekšem tlu te manje ostavljanje tragova na asfaltnim i betonskim površinama. S druge strane, čelične gusjenice su izdržljivije, imaju duži životni vijek (ukoliko su redovito održavane), nude veću stabilnost i mogućnost upotrebe na kamenitom tlu, te na strmim terenima [31].

Općenito gledano, bageri gusjeničari imaju bolju stabilnost zbog nižeg centra težišta, veću produktivnost prilikom obavljanja istih poslova u usporedbi s bagerima na kotačima i mogu postići veću dubinu prilikom kopanja. Manja početna cijena, kao i jeftinije održavanje dodatne su prednosti. Najveća prednost gusjenica u odnosu na kotače jest upotrebljivost na mekanom, strmom ili blatnjavom tlu, gdje bageri na kotačima ne nalaze svoju primjenu, no zato se bageri gusjeničari ne upotrebljavaju na tlu poput asfalta ili betona gdje mogu izazvati oštećenja. Ostali nedostaci primarno su vezani uz transport bagera gusjeničara do potrebne lokacije.



**Slika 17. Prikaz čeličnih (lijevo) i elastomernih (desno) gusjenica [32]**

Bageri na kotačima specifični su po tome što koriste 4 kotača za kretanje umjesto klasičnih gusjenica. Zbog upotrebe kotača, bageri na kotačima imaju viši centar težišta, te zbog toga imaju lošiju stabilnost, pogotovo na neravnom, strmom tlu. Osim toga, vrlo su osjetljivi na mekanom tlu gdje postoji opasnost od propadanja. Na tvrdom tlu, kotači olakšavaju manevriranje i okretanje na mjestu, te se zbog toga bageri na kotačima koriste u urbanim područjima gdje ima manje mjesta. Nadalje, kotači ne oštećuju podlogu na kojoj se nalaze za razliku od gusjenica, što je korisno kad se obavlja posao na asfaltu ili betonu. Upotreba kotača omogućava da bageri imaju veću brzinu kretanja, te se stoga često voze na kotačima do lokacije gdje se obavlja posao, dok se bageri na gusjenicama moraju prevoziti posebnim prikolicama za prijevoz strojeva (tzv. labudicama).

### **3.3.2. Podjela hidrauličnih bagera prema masi**

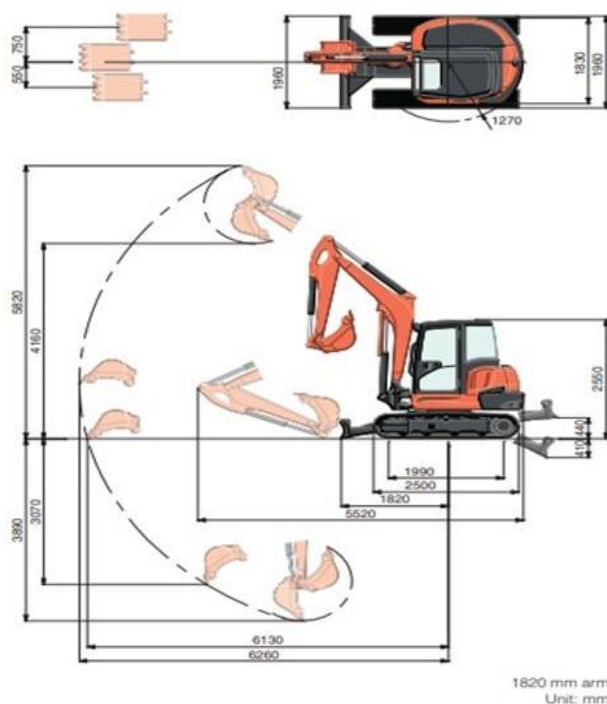
Najčešća podjela hidrauličnih bagera bazira se na njihovoj operativnoj masi, što je vidljivo i u nazivima i oznaka hidrauličnih bagera. Primjer toga jest oznaka 320D na bageru američkog proizvođača Caterpillara, gdje prvi broj 3 govori da se radi o građevinskoj vrsti stroja bager (Caterpillar proizvodi i nudi širok broj i vrstu građevinskih strojeva), dok broj 20 predstavlja maseni razred bagera, odnosno da je riječ o bageru mase 20 tona, što dovoljno govori o važnosti ove podjele hidrauličnih bagera. Slovo D predstavlja seriju, odnosno serija koja je novija u odnosu na prethodne serije B i C [33]. Osnovne masene skupine prema kojima se dijele hidraulični bageri su:

- mini bageri (bageri do 6 tona mase)
- midi bageri (bageri mase od 6 do 10 tona)

- standardni bageri (bageri mase od 10 do 45 tona)
- veliki bageri (bageri od 45 tona mase).

### 3.3.2.1. *Mini bageri*

Bageri najmanjih masa spadaju u skupinu mini bagera. Mini bagere karakterizira visoka brzina, okretljivost te kompaktnost. Svoju primjenu su pronašli u malim, uskim i skućenim prostorima gdje nema pristupa za veće skupine bagera. Neke inačice mini bagera dolaze čak i bez kabine ili s mogućnošću brzog skidanja kabine kako bi pristupili i najužim prostorima. Oni su umanjene verzije standardnih hidrauličnih bagera, te isti princip rada. Osnovni dijelovi su isti kao i kod standardnog hidrauličnog bagera, samo što su umanjeni, uz dodatak noža koji se nalazi na prednjoj strani bagera [Slika 19]. Nož osigurava dodatnu stabilnost prilikom iskopa i dizanja tereta, te omogućava guranje rasutih materijala i lakše ravnanje terena. Tema ovog završnog rada su potrošni dijelovi građevinske mehanizacije, odnosno bagera kao što je ranije spomenuto. Ti dijelovi su uzeti s bagera koji pripada u skupinu mini bagera, te je iz tog razloga ova skupina detaljnije opisana za razliku od ostalih masenih skupina (midi, standardni i veliki hidraulični bageri) [5,34]. Riječ je o modelu KX057-4 japanskog proizvođača Kubote. Značenje oznake KX jest da je to bager koji prilikom okretanja kupole izlazi izvan gabarita svojih gusjenica. Brojevi 057 predstavljaju masenih razred bagera (5,5 tona, ovisno o vrsti gusjenica), dok broj 4 predstavlja seriju kojoj prethode serije 2 i 3, a njezin nasljednik je serija broj 5. Ostale specifikacije [Slika 18] i [Tablica 3], kao i slike samog bagera [Slika 19] dostupni su u nastavku.



Slika 18. Specifikacije bagera Kubota KX057-4 [35]

Tablica 3. Specifikacije bagera Kubota KX057-4 [35]

|                 |                             |                               |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Model           |                             | KX057-4                       |
| Vrsta gusjenica |                             | Elastomerne / Čelične         |
| Motor           | Model                       | Kubota V2607-DI               |
|                 | Izlazna snaga(bruto)        | 47,6 KS (35,5 kW)/ 2200 o/min |
|                 | Izlazna snaga(neto)         | 45,4 KS (33,8 kW)/ 2200 o/min |
|                 | Obujam                      | 2615 cm <sup>3</sup>          |
| Dimenzije       | Ukupna dužina               | 5520 mm                       |
|                 | Ukupna visina               | 2550 mm                       |
|                 | Ukupna širina               | 1960 mm                       |
|                 | Minimalna udaljenost od tla | 310 mm                        |
|                 | Kapacitet pumpe             | 56,1 × 2/ 37,0 × 1 L/min      |

|                                    |                                       |                 |           |               |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------|---------------|
| Hidraulični sustav                 | Sporedan hidraulički protok           | Lijevo/Desno    |           | 37/75 L/min   |
|                                    | Maksimalna sila kopanja               | Lopata/Ruka     |           | 42315/24516 N |
| Pogonski sustav                    | Brzina kretanja                       | Elastomer       | Viša/Niža | 2,8/4,9 km/h  |
|                                    |                                       | Čelik           | Viša/Niža | 2,6/4,6 km/h  |
|                                    | Maksimalna vučna sila                 | Niža brzina     |           | 64400 N       |
|                                    | Duljina zatezne opruge                |                 |           | 1990 mm       |
|                                    | Duljina gusjenica                     |                 |           | 2500 mm       |
|                                    | Širina gusjenica                      | Elastomer/Čelik |           | 400 mm        |
|                                    | Kontaktни притисак на тло             | Elastomer       |           | 30,9/31,4 kPa |
|                                    |                                       | Čelik           |           | 31,4/31,9 kPa |
| Sustav okretanja                   | Brzina okretanja cjeline              |                 |           | 9,3 o/min     |
|                                    | Kut okretanja grane                   | Lijevo/Desno    |           | 70/55°        |
| Nož                                | Dimenzije                             | Širina          |           | 1960 mm       |
|                                    |                                       | Visina          |           | 410 mm        |
|                                    | Maksimalno podizanje iznad razine tla |                 |           | 440 mm        |
|                                    | Maksimalno spuštanje ispod razine tla |                 |           | 405 mm        |
| Hidraulično ulje (spremnik/sistem) |                                       |                 |           | 45/79 L       |
| Spremnik goriva                    |                                       |                 |           | 75 L          |
| Operativna masa stroja             | Elastomer                             |                 |           | 5455 kg       |
|                                    | Čelik                                 |                 |           | 5555 kg       |
| Maksimalna visina kopanja          |                                       |                 |           | 5820 mm       |



|  |             |         |
|--|-------------|---------|
| Maksimalna visina bacanja materijala         |             | 4160 mm |
| Maksimalna dubina kopanja                    |             | 3890 mm |
| Maksimalna vertikalna dubina kopanja         |             | 3100 mm |
| Maksimalni radijus kopanja na tlu            |             | 6130 mm |
| Maksimalni radijus kopanja                   |             | 6260 mm |
| Minimalni radijus okretanja                  | Bez zakreta | 2420 mm |
|  | Sa zakretom | 2005 mm |
| Minimalni radijus okretanja stražnjeg dijela |             | 1270 mm |



Slika 19. Kubota KX057-4

## 4. ZAHTJEVI ZA IZBOR MATERIJALA ZA POTROŠNE DIJELOVE BAGERA

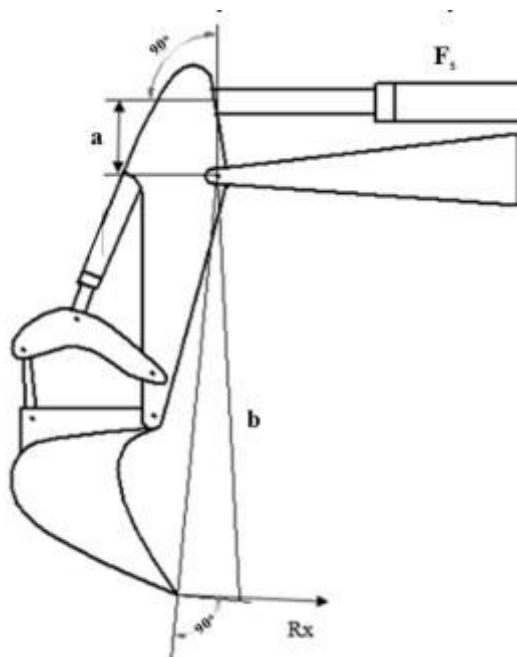
Glavni cilj svake proizvodnje jest dobivanje konačnog proizvoda koji će uz visoku kvalitetu, funkcionalnost, uporabna svojstva i zanimljiv izgled osigurati što veću dobit proizvođaču. Veću dobit je potrebno ostvariti uz što nižu cijenu proizvoda, što je jedino izvedivo kombinacijom raznih faktora poput unaprijeđenih proizvodnih postupaka, konstrukcijskih rješenja, ali i pravilnog izbora materijala. Iako je izbor materijala vrlo važan dio proizvodnog postupka, on se najčešće provodi u početnim koracima procesa, odnosno prilikom konstruiranja proizvoda. Danas se vrlo često može čuti kako je došlo do svojevrsnog zasićenja prilikom upotrebe materijala na bazi željeza u proizvodnji i potrošnji, dok suprotno tome dolazi do rasta i sve veće primjene legura na bazi titanija, aluminija, magnezija, te polimernih, kompozitnih i keramičkih materijala, no vrlo teško će ti materijali u potpunosti moći zamijeniti čelik kod izbora za materijale građevinske mehanizacije. Upravo čelik i njegove različite vrste najbolje zadovoljavaju kriterije i dane zahtjeve prilikom konstruiranja i projektiranja raznih dijelova građevinske mehanizacije. Najvažniji kriteriji su svakako funkcionalnost i eksploataбилnost, no i ostali kriteriji poput tehnološkičnosti, normiranosti, ekonomičnosti, estetičnosti te recikličnosti i ekološkičnosti su također bitni u različitim razmjerima. Svi ti kriteriji bit će konkretno objašnjeni i analizirani u radnim uvjetima za dva konkretna potrošna dijela bagera u nastavku ovoga završnoga rada [36].

### 4.1. Kriteriji za izbor materijala zuba na lopati bagera

Za lakše razumijevanje osnovnih svojstava i zahtjeva koji se postavljaju na zube na lopati bagera, potrebno se najprije upoznati s funkcijom samih zuba, kao i lopate bagera. Kao što je već ranije spomenuto u ovom završnom radu, lopata bagera jedan je od radnih priključaka bagera koja se nalazi na ruci bagera, te ima svoj cilindar kojim se otvara i zatvara lopata. Lopata bagera se koristi prilikom raznih poslova, no definitivno najvažnija funkcija koju obavlja jest kopanje. Prilikom kopanja dolazi do pojave otpora kopanju prilikom interakcije tla i lopate [37]. Sila kopanja držača lopate (ruke bagera), kao što je vidljivo na [Slika 20], jest sila koja nastaje na vrhu zuba na lopati bagera, a do njezine pojave dolazi pomicanjem cilindra ruke. Izračun sile kopanja držača lopate (ruke bagera)  $R_x$  provodi se putem zadane formule:

$$R_x = \frac{F_s \times a}{b} \quad (5)$$

gdje je  $F_s$  – sila cilindra ruke,  $a$  – udaljenost između cilindra ruke i spoja između grane i ruke, te  $b$  – udaljenost između vrha zuba na lopati bagera i spoja između grane i ruke. Maksimalna sila kopanja držača lopate ostvaruje se kada je udaljenost  $a$  na svojem maksimumu [38].



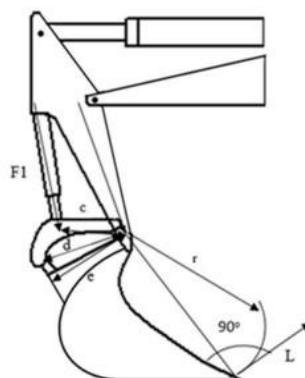
**Slika 20.** Shematski prikaz nastanka sile kopanja držača lopate [38]

Sila kopanja na lopati  $L$  jest sila koja nastaje na vrhu zuba na lopati bagera, a nastaje uslijed pomicanja cilindra lopate. Maksimalna sila kopanja na lopati se postiže kada zub postigne svoju maksimalnu silu.

Izračun sile otkidanja se vrši putem sljedeće jednadžbe:

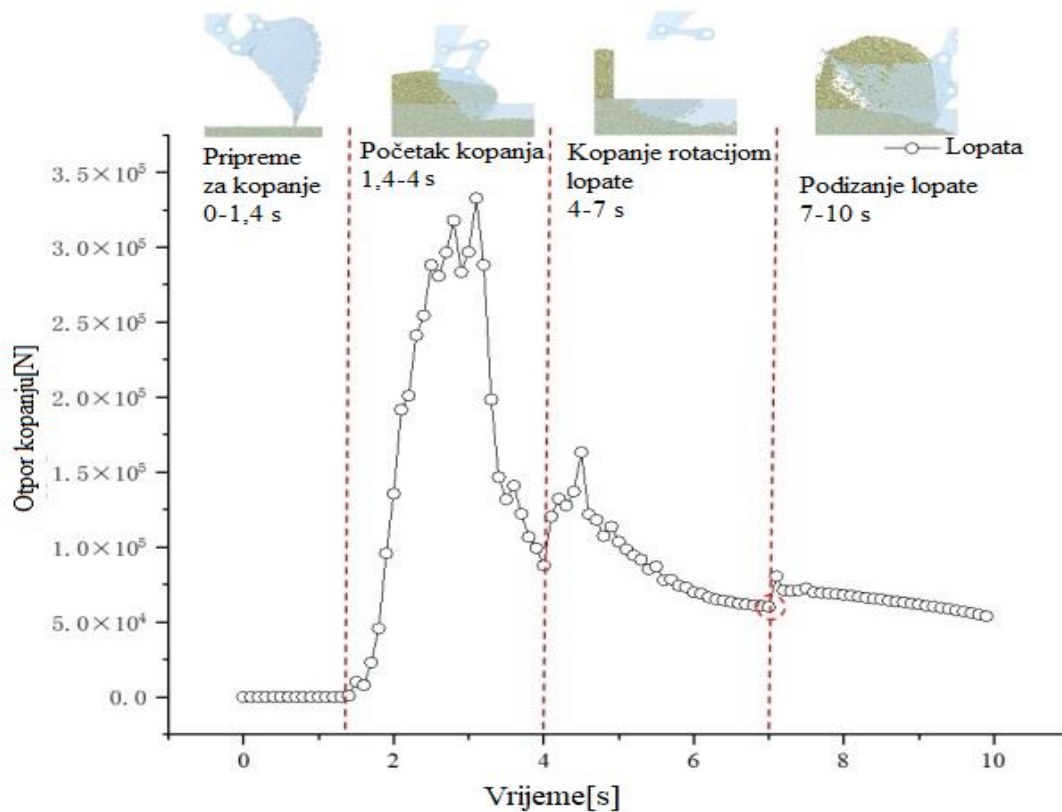
$$L = \frac{d \times r}{c \times e \times F_1} \quad (6)$$

gdje je  $F_1$  – sila cilindra lopate,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $r$  – dimenzije cilindra i držača lopate [38].



**Slika 21.** Sila kopanja na lopati [38]

Jasno je vidljivo iz [Slika 22] da najveći otpor nastaje na početku kopanja, a najveći dio toga otpora preuzimaju zubi na lopati. Primarna funkcija zuba na lopati jest upravo da „razbiju“ i „omekšaju“, odnosno da smanje otpor i time olakšaju kopanje [37].



Slika 22. Otpor lopate prilikom kopanja [37]

Kopanje se odvija u raznim vrstama tla poput zemlje, kamenja, mulja, šljunka i drugih. S obzirom da svako tlo ima različita svojstva i stvara različit otpor na lopatu, postoji više oblika zubi koji se koriste (zubi za kamen, konusni zubi, kvadratni zubi za zemlju, široki zubi, utovarni zubi i mnogi drugi) [Slika 23]. Pravilan odabir vrste zuba može smanjiti ukupno naprezanje na lopatu i može povećati samu efikasnost i produktivnost kopanja [39].



**Slika 23. Različiti oblici zuba za bagere (lijevo) i lopata sa zubima (desno) [39]**

Isto tako, prilikom kopanja zubi su izloženi direktnom kontaktu s rasutim materijalom koji sadrži čestice različitih veličina, oblika i tvrdoće. Prilikom tog kontakta s česticama dolazi do trošenja i pucanja zubi, koji mogu uzrokovati prekid rada bagera zbog zamjene zubi ili smanjiti učinkovitost kopanja koja dovodi do gubitka novaca, vremena i produktivnosti. Na temelju gore navedenih podataka, dolazimo do zaključka da je vrlo bitan pravilan odabir materijala kako bi se maksimizirao učinak i sama efikasnost kopanja [40].

#### **4.1.1. Funkcionalnost**

Definicija funkcionalnosti jest da je to skup kriterija poput magnetičnosti, toplinske ili električne vodljivosti, prozirnosti i drugih svojstava koji osiguravaju da će konačan proizvod postići željene funkcije tijekom stvarne uporabe. Funkcionalnost proizvoda narušavaju sljedeće pojave:

- promjene oblika i dimenzija uzrokovane velikim elastičnim i plastičnim deformacijama
- negativne promjene integriteta cjeline koje dovode do loma [36].

Kako bi zubi za lopatu bagera postigli kriterij funkcionalnosti, moraju imati određena svojstva koja zadovoljavaju određene zahtjeve. Krutost materijala govori o veličini elastične deformacije pod opterećenjem. Na krutost zubi utječe geometrija samog zuba (njegov oblik i dimenzije), modul elastičnosti te odabir materijala. Definicija čvrstoće jest da je to otpornost na deformacije ili lom pri djelovanju kratkotrajnog mehaničkog opterećenja. Otpornost na pojavu plastičnih deformacija, koja se pojavljuju pri naprezanjima većim od granice tečenja, ovisi o čvrstoći i granici elastičnosti materijala. Elastične deformacije pojavljuju se pri naprezanjima manjim od granice tečenja. Kako bi zubi podnosili opterećenja u elastičnom području, vrlo je važno da imaju dovoljnu visoku granicu tečenja. Posljednji zahtjev vezan uz kriterij funkcionalnosti jest otpornost na udarce, a svojstvo koje odgovara navedenom zahtjevu

jest žilavost materijala. Žilavost je svojstvo materijala koje definira njegovu sposobnost apsorpiranja mehaničke energije vanjskog opterećenja. Za razliku od ostalih svojstava poput čvrstoće i modula elastičnosti, žilavost se ne može brojčano usporedno iskazivati, već se određuje na temelju provedenih ispitivanja [36].

#### **4.1.2. Eksploatabilnost**

Kriterij eksploatabilnosti predstavlja ponašanje konačnog proizvoda tijekom eksploatacije, tj. tijekom upotrebe u realnim radnim uvjetima. Kako bi ovaj kriterij bio zadovoljen, važno je da proizvod zadrži svoju funkciju tijekom uporabe, te su na taj način eksploatabilnost i funkcionalnost međusobno povezani. Održavanje funkcija tijekom vremena ocjenjuje se kroz:

- održavanje definiranih dimenzija i oblika
- održavanje integriteta cjeline – sprječavanje pojave loma
- održavanje integriteta površine – sprečavanje oštećenja površine.

Kod zubi za lopatu bagera najvažniji zahtjev vezan uz eksploatabilnost, ali i najvažniji zahtjev među svim ostalim kriterijima, jest otpornost na trošenje. Mehanizmi trošenja, kao i tražena svojstva kojima se zadovoljava ovaj zahtjev, detaljnije su opisani u [4.2]. Drugi važan zahtjev koji se nameće za zube, koji je također vezan uz održavanje integriteta površine tijekom vremena, jest otpornost na koroziju. Zubi za lopatu bagera su gotovo uvijek prilikom upotrebe izloženi vanjskim uvjetima, te su pod utjecajem atmosfere, vlage, ponekad i soli, a to su agresivni uvjeti koji pospješuju napredovanje korozije. Osim toga, prilikom kopanja, zubi se nalaze u tlu, koje može djelovati prilično korozijski agresivno. Kod zubi za lopatu bagera korozijska postojanost se postiže legiranjem kromom u kombinaciji s korištenjem prevlaka, što je detaljnije opisano u [4.1.3.2] [36].

#### **4.1.3. Tehnologičnost**

Pojam tehnologičnosti obuhvaća mogućnost izvodljivosti konstrukcijskog rješenja, odnosno prikladnost i sposobnost materijala za obradu ili oblikovanje nekim tehnološkim postupkom. Cilj proizvodnje jest da se primjenom najdostupnijih materijala postigne točno propisana kvaliteta proizvodnje uz što niže troškove. Proizvodna svojstva materijala govore o njegovoj sposobnosti lijevanja, rezljivosti, deformabilnosti, zavarljivosti, lemljivosti i drugima.

Kovanje je postupak oblikovanja metala deformiranjem u kojem primjenom mehaničke i toplinske energije dolazi do promjene oblika materijala u krutom stanju. Prednosti zubi dobivenih kovanjem su: bolja otpornost na trošenje, dobra mehanička svojstva i duži vijek

trajanja. Jedini nedostatak ovog postupka je visoka cijena, zbog čega se ovaj postupak rjeđe primjenjuje pri proizvodnji zubi na lopati bagera [41].

Drugi postupak proizvodnje zubi na lopati bagera jest lijevanje. Opis lijevanja jest da je to postupak dobivanja gotovog proizvoda koji se naziva odljevak, dovođenjem rastaljenog materijala u kalupe te njegovim skrućivanjem. Prednosti ovog postupka u proizvodnji zubi su: niža cijena, vrlo dobra tvrdoća, manja masa konačnog proizvoda, te lakša i jeftinija oblikovljivost. Nedostatci su vezani uz probleme koji se javljaju kod lijevanja poput poroznosti, te nešto niže otpornosti na trošenje koja je i dalje vrlo dobra, stoga je ovaj postupak zastupljeniji prilikom proizvodnje zubi.

#### 4.1.3.1. Toplinska obrada zubi na lopati bagera

Kako bi se postigla željena svojstva, zubi za lopatu bagera se tijekom proizvodnje toplinski obrađuju. Izlažu se toplinsko-vremenskim ciklusima kako bi se postigla određena mikrostruktura, a time i željena svojstva. Toplinska obrada se najčešće sastoji od normalizacijskog žarenja i poboljšavanja, odnosno kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Normalizacijsko žarenje sastoji se od austenitizacije i hlađenja na mirnom zraku s ciljem dobivanja jednolike i sitnozrnate mikrostrukture. Kaljenje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od tri jednostavnija postupka. Čelik se prvo zagrijava do temperature austenitizacije i progrijava, zatim se drži na temperaturi austenitizacije (s ciljem otapanja ugljika i legirnih elemenata u austenitu), a potom gasi u različitim medijima s ciljem postizanja martenzitne mikrostrukture. Svrha kaljenja je postizanje maksimalno moguće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku (čime se poboljšava otpornost na trošenje), te postizanje što jednoličnije tvrdoće po presjeku, odnosno prokaljenosti. Nakon kaljenja, čelik se najčešće izlaže visokotemperaturnom popuštanju. Visokotemperaturno popuštanje se provodi na temperaturama višim od 400 °C s ciljem postizanja visoke granice tečenja i žilavosti. Ovaj postupak se primjenjuje za konstrukcijske čelike od kojih se zubi najčešće proizvode [42].

Osim konstrukcijskih čelika, često se koriste i nodularni ljevovi. Toplinska obrada nodularnog lijeva provodi se s ciljem dobivanja strukture bainitnog ferita u postupku koji se naziva izotermičko poboljšavanje. Izotermičko poboljšavanje se sastoji od austenitizacije na temperaturu od 900 °C, gašenja u solnoj kupci na temperaturu izotermičke pretvorbe koja se događa na oko 220 °C. Brzim gašenjem se izbjegava transformacija u perlit. Izotermički poboljšani nodularni ljevovi posjeduju dobru kombinaciju svojstava poput čvrstoće, žilavosti i otpornosti na trošenje [43]. Kako bi se maksimizirao učinak postupka toplinske obrade, važno

je pravilno podesiti parametre toplinske obrade, kao i pažljivo odabrati početni materijal. Ovim postupkom zadovoljavaju se oba temeljna zahtjeva postavljena na zube koji se nalaze na lopati bagera.

#### 4.1.3.2. *Prevlačenje zubi na lopati bagera*

Osim primjene toplinske obrade, povećana otpornost na trošenje postiže se i primjenom postupka prevlačenja površine, kojima se postiže veća tvrdoća na površini. Prevlačenje se najčešće provodi navarivanjem, s obzirom na to da je osnovni materijal zubi na lopati niskolegirani čelik s niskim ili srednjim sadržajem ugljika. Prevlake koje se koriste dijele se najčešće u dvije grupe:

- legirani čelici koji sadrže krom, vanadij ili niobij
- materijali sa zavarljivom feritnom matricom koji sadrže volframove karbide različitih veličina i oblika.

Iako se pod opterećenjem može pojaviti inicijalna pukotina uslijed debljine prevlake, korištenje prevlaka i dalje ostaje najekonomičniji način poboljšanja otpornosti na trošenje zubi na lopati bagera, bez značajnijih gubitaka duktilnosti i čvrstoće [38,44].

#### 4.1.4. *Normiranost i ekonomičnost*

Drugi naziv koji se koristi za normiranost je standardnost, a taj kriterij se odnosi na ispunjavanje normiranih svojstava prilikom biranja materijala. Ne postoji norma koja jednoznačno određuje od kojeg materijala se proizvode zubi za lopatu bagera, no sama lopata bagera je najčešće izrađena od niskolegiranog čelika s niskim sadržajem ugljika, poznatiji pod trgovačkim nazivom Hardox, stoga je prikladno da se prilikom izbora materijala za zube koristi materijal sličnog kemijskog sastava sa sličnim ili poboljšanim mehaničkim svojstvima.

Kriterij ekonomičnosti se može opisati s tri pojma – raspoloživost, nabavljivost i cijena. Ta tri pojma govore o tržišnosti proizvoda [36]. Kao što smo već spomenuli, zubi za lopatu bagera su potrošni dijelovi, izloženi vrlo agresivnom trošenju jer su u direktnom kontaktu s raznim vrstama tla u kojima vladaju različiti uvjeti. Njihovo trošenje uzrokuje u konačnici i lom samoga zuba, dok se već nakon određenog stupnja istrošenosti smanjuje produktivnost i efikasnost kopanja. Kako bi se izbjegle ove neželjene posljedice, zubi se mijenjaju nakon određenog broja radnih sati ili nakon određenog stadija istrošenosti. Stoga je vrlo bitno da ti zubi budu odmah raspoloživi na tržištu, a poželjno bi bilo da poduzeće koje ima u vlasništvu svoje bagere ima zube u vlastitom skladištu, kako bi se maksimalno smanjilo vrijeme prekida



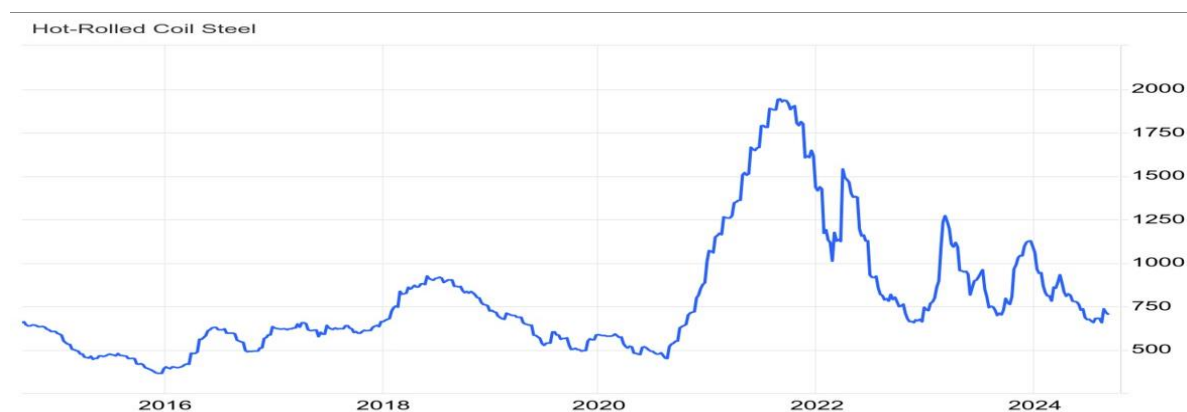
rada uzrokovano zamjenom zubi. Držanje zubi u skladištu olakšava i činjenica da su zubi za lopatu bagera relativno jeftini, no cijene variraju ovisno o tome o kojoj vrsti bagera je riječ, s obzirom da vrijedi princip da što je bager veći, veća je i lopata koju koristi, a samim time veći su i zubi na lopati, te im je i veća cijena. Na cijenu naravno utječu mehanička svojstva koja posjeduje zub, na koja utječu predizbor materijala i proizvodni postupci.

#### 4.1.5. Estetičnosti

Iako je danas estetičnost možda i najvažniji kriterij prilikom odabira proizvoda u širokom spektru proizvođača i proizvoda koji konkuriraju jedan drugome, kod dijelova poput zubi za lopatu bagera, kao i općenitih potrošnih dijelova građevinske mehanizacije, ona nije primaran zahtjev. Zubi za lopatu su vrlo često u različitim bojama koje se uglavnom vežu uz proizvođače koji imaju običaj da se na tržištu građevinske mehanizacije vežu uz jednu boju prepoznatljivu za njihov brend. Opće je poznato da je vizualni izgled najvažniji aspekt marketinga i vrlo dobar način za ostvarivanje „komunikacije“ između kupca i proizvoda, te se na taj način poboljšava prodaja i ostvaruje se bolja pozicija na tržištu. Osim toga, neke tvrtke korištenjem boja žele naglasiti poboljšana svojstva svojih proizvoda poput trajnosti, izdržljivosti, poboljšane čvrstoće i slično. Najvažnija uloga boje općenito u građevini jest povezanost sa sigurnosnim mjerama pomoću kojih se na taj način signalizira opasnost od pokretnih dijelova strojeva i pridonosi boljoj vidljivosti na gradilištu i u okolini.

#### 4.1.6. Recikličnost i ekologičnost

Čelik je jedan od najrecikliranih materijala današnjice, koji se nakon recikliranja može ponovo upotrijebiti za proizvodnju istoga. Osim što se recikliranjem pridonosi zaštiti okoliša, također se može steći i materijalna korist. Istrošeni i puknuti zubi za bagere se vrlo lako mogu zbrinuti na otkupnim stanicama koje otkupljuju i zbrinjavaju otpad. Prema informacijama s internetske stranice londonske burze, otkupna cijena čelika na dan 2. 9. 2024. iznosi 654 \$ po toni [45].



Slika 24. Graf prosječnih cijena čelika u razdoblju u razdoblju od 2014. do 2024. [45]

## 4.2. Trošenje zubi na lopati bagera

Kao što je već spomenuto, najvažniji zahtjev prilikom izbora materijala za zube na lopati bagera jest otpornost na trošenje. Zbog opširnosti i prisutnosti više različitih procesa trošenja, ovaj zahtjev je posebno obrađen kroz ovaj podnaslov. U tribologiji su prihvaćena 4 osnovna mehanizma trošenja koja dovode do gubitka materijala s površine krutog tijela:

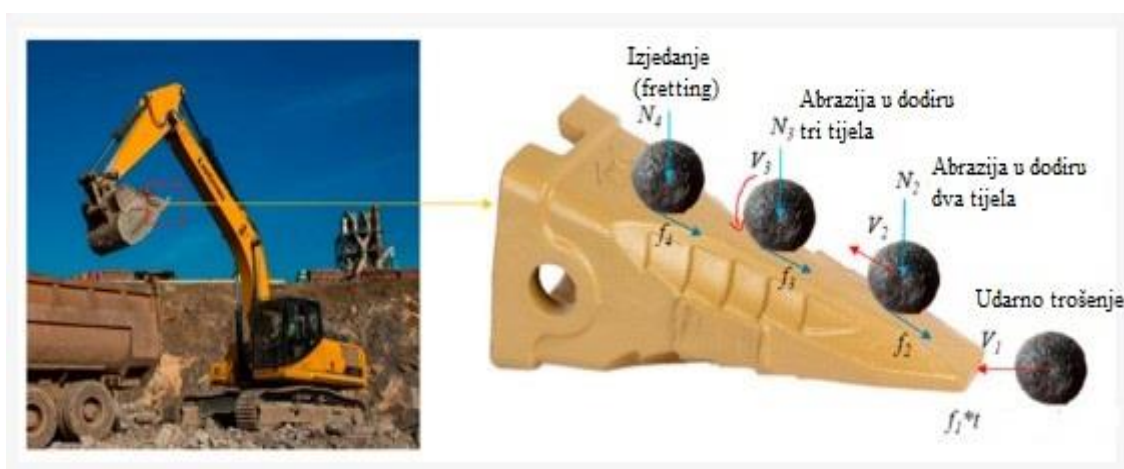
- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija [46].

Osim mehanizama trošenja, ostali kriteriji za određivanja slučaja trošenja su:

- relativno gibanje - razlikujemo klizanje, kotrljanje, udarce, vibracije, valjanje i strujanje
- elementi tribosustava – to mogu biti kruta tijela, čestice, tekućine, plinovi i međumediji u raznim kombinacijama [36].

### 4.2.1. Procesi trošenja zubi za lopatu bagera

Proces trošenja sastoji se od minimalno dvaju ili više mehanizama trošenja koja djelovati pojedinačno ili kombinirano, ovisno o radnim uvjetima, elementima tribosustava i relativnom gibanju. Zbog različitih vrsta materijala s kojima su u dodiru i različitih radnih uvjeta kojima su izloženi, analiza procesa trošenja kojima su izloženi zubi za lopatu bagera vrlo je kompleksna. Svaki dio zuba izložen je različitom procesu trošenja prikazanom na [Slika 25] [39].



Slika 25. Procesi trošenja zuba za lopatu bagera [39]

Osim ovih procesa uzrokovanih direktnim djelovanjem materijala, prisutne su i kemijske reakcije uzrokovane agresivnom okolinom koje često dovode do korozije zubi koji se nalaze na lopati bagera.

#### 4.2.1.1. Udarno trošenje

Udarno trošenje je prvi proces trošenja prisutan kod zubi za lopatu bagera, kod kojeg je najdominantniji mehanizam trošenja umor površine, dok je utjecaj abrazije i adhezije srednji. Do ovog procesa trošenja dolazi prilikom udarca zuba u tvrdi objekt gdje dolazi do stvaranja velike udarne sile, koja može uzrokovati lokalne deformacije, pojavu pukotina ili otkidanja površine zuba. Kontinuirani udarci tijekom vremena oslabljuju strukturu zuba i dovode do ubrzanog trošenja [39]. Otpornost na udarno trošenje postiže se izborom materijala koji imaju dominantno svojstvo dinamičke izdržljivosti površine [46]. Kod čelika koji se primjenjuju za izradu zubi za lopatu bagera dobra dinamička izdržljivost se postiže primjerenom toplinskom obradom, odnosno kaljenjem i popuštanjem, dok se to kod nodularnog lijeva postiže izotermičkim poboljšavanjem.

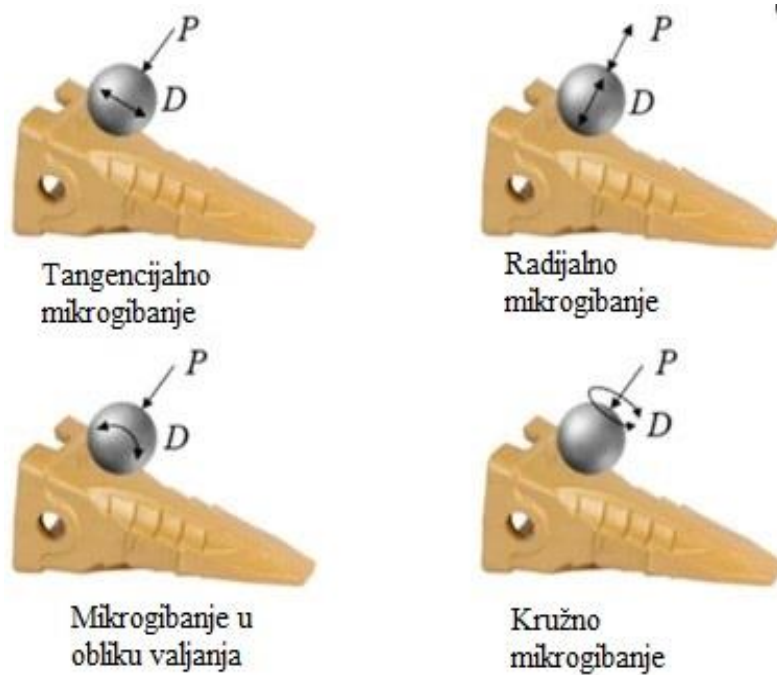
#### 4.2.1.2. Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje je proces trošenja koji izaziva najveće štete od svih procesa trošenja. To je istiskivanje materijala uzrokovano tvrdim česticama ili izbočinama [46]. Prilikom zatvaranja lopate, u slučajevima kada se kopa ili utovaruje materijal, zubi polako penetriraju u materijal. Materijal svojom težinom uzrokuje pritisak na zub, te dolazi do relativnog gibanja klizanja, što je primjer abrazije u dodiru dvaju tijela. Kod otvaranja lopate, ona je okrenuta prema dolje, te dolazi do kotrljanja materijala. Kontakt ostvaren između zubi i materijala je minimalan, te je to slučaj abrazijskog trošenja u dodiru tri tijela. Konstantno ponavljanje ove interakcije s abrazivnim materijalima dovodi do mikrorezanja i gubitka materijala. Dominantno svojstvo kojim se iskazuje otpornost prema abrazijskom trošenju jest tvrdoća [39]. Tvrdoća kod zubi koji se koriste na lopati bagera se postiže kaljenjem površine ili nanošenjem prevlaka na površinu. Osim toga, izborom pravog oblika zubi može se smanjiti i opterećenje uzrokovano tvrdim materijalima u tlu.

#### 4.2.1.3. Izjedanje

Izjedanje (engl. *fretting*) je proces trošenja koji nastaje između dviju prividno čvrstih spojenih površina uslijed vibracijskog relativnog gibanja [46]. Od svih mehanizama trošenja, najveća je opasnost od tribokorozije i umora površine. Kao što je spomenuto kod abrazijskog trošenja,

prilikom kontakta materijala i zuba dolazi do stvaranja međusobnog pritiska uslijed kojeg ostaju stacionarni. Međutim, bilo kakve vibracije ili opterećenja uzrokovana okolinom dovode do vibracijskog gibanja malih amplituda (mikrogibanja), koja uzrokuju izjedanje tijekom perioda mirovanja. Izjedanje uzrokuje plastične deformacije i pukotine u prividno spojenim površinama uslijed kontaktnom pritiska, te dolazi do pojavljivanja korozije u obliku oksidnog sloja oko kontaktne površine. Ti oksidni slojevi mogu uzrokovati i umor površine u kontaktnoj zoni [39].



Slika 26. Mikrogibanja na zubu lopate bagera [39]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO – ODREĐIVANJE KEMIJSKOG SASTAVA ISTROŠENOG I NOVOG ZUBA ZA LOPATU BAGERA

Kao eksperimentalni dio ovog završnog rada provedeno je ispitivanje kemijskog sastava jednog istrošenog zuba skinutog s lopate i jednog novog zuba koji će zamijeniti istrošeni. Ispitivanje kemijskog sastava provedeno je u suradnji s tvrtkom Instrumentacija ELI-MP d.o.o. iz Zagreba. Određivanje kemijskog sastava je provedeno uz pomoć dvije metode za svaki uzorak.



Slika 27. Uzorci korišteni za eksperimentalni dio

[Slika 27] prikazuje stanje uzoraka koji su korišteni pri određivanju kemijskog sastava. Uzorak 1, zub koji je skinut s lopate bagera, poprilično je dotrajao i potrošen. Tragovi trošenja su vidljivi posebice na vrhu zuba, gdje se vidi značajan gubitak mase zuba, kao i zaobljenost vrha koja bi trebala biti oštra kako bi osigurala maksimalno prodiranje u tlo prilikom kopanja. Također, na uzorku 1 su vidljivi manji znakovi korozije. Uzorak 2 je zub uzet iz skladišta koji će zamijeniti dotrajali zub. Na zubu su vidljivi tragovi dotrajalosti, no funkcionalna karakteristika je potpuno ispravna, što se vidi po samome vrhu koji je oštari. Na uzorku 2 je također vidljiva oznaka JCB koja predstavlja britansku tvrtku poznatu po proizvodnji građevinskih strojeva i dijelova, stoga je karakteristične crne boje koja predstavlja njihov brend.

### 5.1. Određivanje kemijskog sastava XRF metodom

Prva metoda kojom je provedeno određivanje kemijskog sastava jest rendgenska fluorescencijska spektroskopija (engl. *X-ray fluorescence*) ili skraćeno XRF. To je analitička metoda koja se često primjenjuje za određivanje kemijskog sastava u znanstvene ili industrijske svrhe. Metoda se temelji na registraciji sekundarnog, tj. fluorescentnog rendgenskog zračenja, te je ova metoda u potpunosti ne destruktivna za uzorke. Ovom metodom je moguće provesti kvantitativne i kvalitativne analize, kao i detektirati koncentracije elemenata.

Sekundarno zračenje nastaje prilikom izlaganja materijala rendgenskom zračenju iz rendgenske cijevi, čija je energija dovoljno visoka da izbaci elektron iz neke od unutrašnjih ljuski atoma u tom materijalu, te će atomi uslijed nastalih vakancija biti pobuđeni i nestabilni. Vraćanje u niže energetske stanje događa se uskakanjem elektrona iz vanjskih ljuski, pri čemu dolazi do oslobađanja karakterističnog rendgenskog zračenja čija je energija jednaka razlici energija elektrona u raznim ljuskama koja je karakteristična za svaki element.

Ispitivanje je provedeno na uređaju XRF X-MET 8000 japanskog proizvođača Hitachi. Uređaj u samo nekoliko sekundi može odrediti o kojem metalu se radi tako što dobiveni kemijski sastav uspoređuje s bazom podataka koja je pohranjena u njemu. Bazu podataka može pristupiti i korisnik, te su tamo dostupne razne legure čelika, aluminija, titanija, nikla, bakra i plemenitih metala prema AISI, DIN, JIS i GB normama. Dobiveni podatci o kemijskom sastavu se očitavaju s preglednog ekrana uređaja, gdje je vidljiv točan kemijski sastav, kao i točno određen naziv npr. čelika koji je analiziran [47].

**Tablica 4. Tehničke specifikacije uređaja XRF X-MET 8000 [47]**

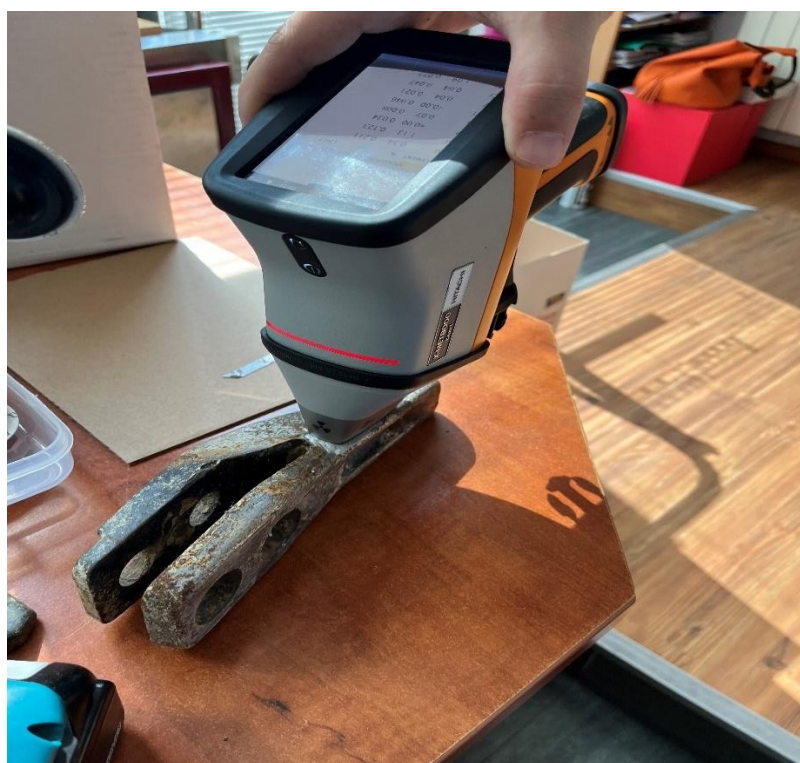
|  |   |
|--|---|
| <p>Analizator:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ručni energetski disperzivan rendgenski fluorescentni analizator</li> <li>• Silikonski SDD detektor visoke rezolucije koji pokriva veliko područje</li> <li>• Rendgenska cijev (4 W; 4 kV maks.; 4 <math>\mu</math>A)</li> <li>• Veličina mjernog područja: 10,7 × 9,4 mm</li> <li>• Radna temperatura od -10 °C do 50 °C</li> </ul> | <p>Masa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,3 kg bez/1,5 kg s baterijom</li> </ul> <p>Dimenzije:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 93 mm (širina) × 210 mm (dužina) × 170 mm (visina)</li> </ul> |
| <p>Ekran i operativni sustav:</p>  | <p>Integrirana kamera:</p>  |

|  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4,3 inča Blanview ekran na dodir</li> <li>• Rezolucija ekrana: 480 × 800 točka</li> <li>• 16 GB interne memorije</li> <li>• Mogućnost pohrane do 100 000 rezultata i slika</li> <li>• Mogućnost WiFi, USB i Bluetooth prijenosa podataka</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezolucija kamere 640 × 480 piksela</li> <li>• Površina fotografije na uzorku 7,5 mm × 6 mm</li> </ul> <p>Umjeravanje (kalibracija):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tvornički ugrađeni osnovni parametri i empirički kalibratori za razne primjene (čelik, drvo i slično)</li> </ul> |
| <p>Analitičko područje:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Od magnezija do uranija; ovisno o modelu, do 35 različitih elemenata</li> </ul>   | <p>Punjiva baterija koja traje od 10 do 12 sati</p>   |
| <p>Sigurnosne zaštita od radijacije:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zaključavanje uređaja zaporkom</li> <li>• Infracrveni senzor udaljenosti</li> <li>• Senzor mjerenja radijacije</li> <li>• Upozoravajuća svjetla</li> </ul>   | <p>Mjerenje vrućih uzoraka:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maksimalna temperatura uzorka 120 °C</li> </ul>  |

Prije provedenog ispitivanja, uzorci su obrađeni brusnim papirom granulacije 80, te je zatim provedeno ispitivanje uređajem XRF X-MET 8000. Na uređaju se prvo podese svi parametri, nakon čega se uređaj nasloni na uzorak, te se pritisne takozvani „okidač“ uređaja. Važno je uređaj držati čvrsto kako bi se ostvario dobar kontakt između uređaja i uzorka, te je važno da ispitna površina uzorka bude što ravnija [Slika 28] [Slika 29] [Slika 30]. Nakon svega nekoliko sekundi dobivaju se rezultati ispitivanja na ekranu uređaja.



**Slika 28. Tijek ispitivanja uzorka 1 XRF metodom**



**Slika 29. Tijek ispitivanja uzorka 1 XRF metodom**





**Slika 30. Tijek ispitivanja uzorka 2 XRF metodom**

U [Tablica 5] i [Tablica 6] su dostupni rezultati dobiveni mjerenjem XRF metodom. Iz rezultata se može primijetiti visok udio silicija, a razlog tomu je što je površina prethodno obrađena brusnim papirom. Osim toga, na rezultatima nema udjela ugljika, što je nedostatak ove metode.

**Tablica 5. Kemijski sastav dobiven XRF metodom za uzorak 1**

| <b>Datum mjerenja: 17. 7. 2024.</b>           |             | <b>Uredaj: X-MET XRF Analizator 804787</b> |           |         |
|---|-------------|--|-----------|---------|
| <b>Ocjena: C-0,5 Mo (1,75), C-1026 (1,83)</b> |             | <b>Metoda mjerenja: niskolegirani</b>      |           |         |
| Element                                       | Maseni udio | Min.                                       | Maks.     | +/-     |
| Fe  | 96,809 %    | 90,000 %                                   | 100,000 % | 0,077 % |
| Si  | 1,251 %     | —  | —         | 0,038 % |
| Mn  | 0,973 %     | 0,500 %                                    | 0,800 %   | 0,037 % |
| Cr  | 0,743 %     | —  | 1,000 %   | 0,025 % |
| Al  | 0,481 %     | —  | —         | 0,069 % |

|    |         |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|---------|
| Mo | 0,089 % | 0,440 % | 0,650 % | 0,005 % |
| S  | 0,071 % | —       | —       | 0,003 % |
| Pb | 0,049 % | —       | —       | 0,026 % |
| Cu | 0,039 % | —       | —       | 0,010 % |
| W  | 0,021 % | —       | —       | 0,012 % |
| P  | 0,014 % | —       | —       | 0,011 % |
| Ti | 0,013 % | —       | —       | 0,024 % |
| V  | 0,002 % | —       | —       | 0,008 % |
| Nb | 0,001 % | —       | —       | 0,002 % |
| Zr | 0,000 % | —       | —       | 0,002 % |
| Ni | < 0 %   | —       | 1,000 % | 0,009 % |

**Tablica 6. Kemijski sastav dobiven XRF metodom za uzorak 2**

| <b>Datum mjerenja: 17. 7. 2024.</b>           |             | <b>Uredaj: X-MET XRF Analizator 804787</b> |           |         |
|---|-------------|--|-----------|---------|
| <b>Ocjena: C-0,5 Mo (1,39), C-1026 (2,63)</b> |             | <b>Metoda mjerenja: niskolegirani</b>      |           |         |
| Element                                       | Maseni udio | Min.                                       | Maks.     | +/-     |
| Fe  | 95,900 %    | 90,000 %                                   | 100,000 % | 0,082 % |
| Si  | 1,553 %     | —  | —         | 0,042 % |
| Cr  | 1,486 %     | 1,000 %                                    | 1,500 %   | 0,035 % |
| Mn  | 0,821 %     | 0,300 %                                    | 0,800 %   | 0,037 % |
| Al  | 0,144 %     | —  | —         | 0,052 % |
| Mo  | 0,110 %     | 0,420 %                                    | 0,650 %   | 0,005 % |
| Ni  | 0,107 %     | —  | 1,000 %   | 0,021 % |
| Pb  | 0,107 %     | —  | —         | 0,026 % |
| S   | 0,062 %     | —  | —         | 0,003 % |
| P   | 0,052 %     | —  | —         | 0,011 % |
| Cu  | 0,035 %     | —  | —         | 0,009 % |
| Ti  | 0,008 %     | —  | —         | 0,024 % |

|    |         |   |   |         |
|----|---------|---|---|---------|
| Nb | 0,004 % | — | — | 0,002 % |
| W  | 0,004 % | — | — | 0,011 % |
| V  | 0,003 % | — | — | 0,008 % |
| Zr | 0,002 % | — | — | 0,002 % |

## 5.2. Određivanje kemijskog sastava LIBS metodom

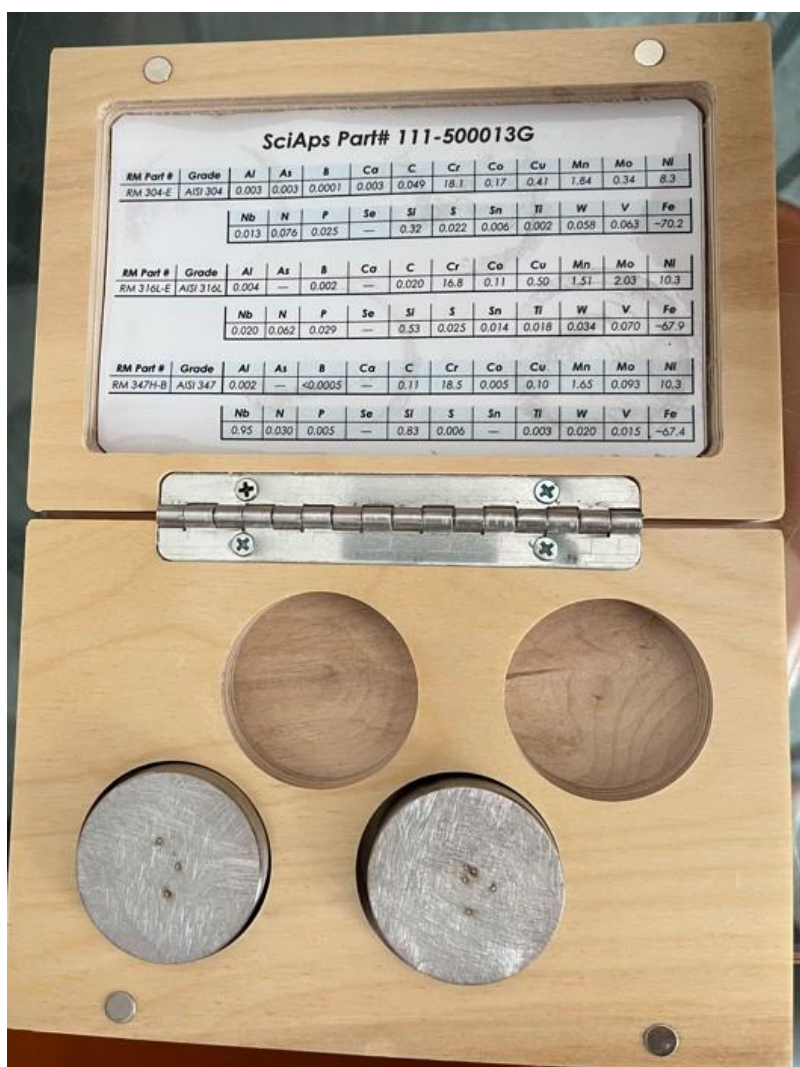
Druga metoda kojom je određen kemijski sastav istih uzoraka jest laserski inducirana probojna spektroskopija (engl. *Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) ili skraćeno LIBS jest metoda koja koristi visokoenergetsku fokusiranu pulsirajuću lasersku zraku za pobuđivanje uzorka u stanje plazme. Time se generira odgovarajući emisijski spektar za analizu. Valna duljina spektra emisije elemenata izravno je povezana s vrstom elementa, a intenzitet spektralnih linija elementa povezan je sa sadržajem elementa. Ovom metodom je moguće provesti i kvalitativnu i kvantitativnu analizu kao i kod XRF metode. Za razliku od XRF metode, ova metoda ne koristi rendgensko zračenje, već prilikom obrade uzorka laserom dolazi do „spaljivanja“ malog dijela površine koji ostaje vidljiv kao mala udubina u metalu, što znači da je ovo destruktivna metoda kod koje je destrukcija svedena na minimum.

Ispitivanje je provedeno uređajem Z-903 Carbon proizvođača SciAps, SAD, koji je izgledom sličan XRF uređaju s obzirom da je prijenosan i omogućuje rad na terenu. Sličnost je i u tome što također posjeduje bazu podataka legura različitih materijala kao i XRF uređaj. Dobiven kemijski sastav elemenata, kao i točan naziv legure, prikazuju se na ekranu pri završetku ispitivanja [48].

**Tablica 7. Tehničke specifikacije uređaja Z-903 Carbon [48]**

|  |   |
|--|---|
| Masa: 2,24 kg s baterijom                      | WiFi, USB, Bluetooth i GPS povezivanje  |
| Dimenzije: 269×82×269mm                        | Integrirana kamera i laserski pokazivač za gledanje uzoraka prije i tijekom ispitivanja za pravilno namještanje uređaja |
| Ekran: 3,5 inča, visoko osvijetljeni, na dodir | 3 – D laserski raster za detaljno analiziranje  |
| Snaga: punjiva Li-ionska baterija              | 316 nehrđajući čelik za automatsku kalibraciju uređaja i provjeru valnih duljina  |
| Valna duljina: 190 – 950 nm                    | Visoko optimizirano korisničko sučelje  |

LIBS ispitivanje je provedeno nakon XRF ispitivanja, stoga je površina već bila unaprijed polirana brusnim papirom. Prije provedbe samog mjerenja uređaj se umjerava (kalibrira), to jest provjerava se njegova ispravnost uz pomoć uzoraka koji služe kao etaloni, a dobiju se uz uređaj [Slika 31]. Nakon što je provedena provjera, utvrđeno je da je uređaj ispravan i spreman za provedbu ispitivanja. Kao i kod XRF metode, uređaj se prisloni na ravnu površinu uzorka te se čvrsto primi kako bi se ostvario čim bolji kontakt, te se pritisne gumb kako bi započelo ispitivanje koje traje svega nekoliko sekundi. Rezultati ispitivanja se nakon toga pojavljuju na preglednom ekranu. Nakon ispitivanja moguće je uočiti vrlo mali trag ispitivanja na površini koji bi se mogao okarakterizirati kao mjesto koje je „spaljeno“, koje uzrokuje visoka energija lasera [Slika 34].



Slika 31. Uzorci za provjeru ispravnosti LIBS uređaja



**Slika 32. Tijek ispitivanja uzorka 1 LIBS metodom**



**Slika 33. Tijek ispitivanja uzorka 2 LIBS metodom**



Slika 34. Trag LIBS ispitivanja na uzorku

Isto kao i kod XRF metode, na rezultate ispitivanja je utjecalo prethodno poliranje površine, te je zbog toga povišeni udio silicija. No za razliku od XRF ispitivanja, ovom metodom je dobiven i udio ugljika što je velika prednost ove metode. U tablicama [Tablica 8] i [Tablica 9] su dostupni rezultati mjerenja dobiveni LIBS metodom.

Tablica 8. Kemijski sastav dobiven LIBS metodom za uzorak 1

| Čelik C40 (vjerojatnost 89,9 %) |             |         |                               |
|---------------------------------|-------------|---------|-------------------------------|
| Kemijski element                | Maseni udio | + / -   | Referentne vrijednosti legure |
| Fe                              | 96,74 %     | ± 0,208 | 0,000 – 100 %                 |
| Si                              | 1,09 %      | ± 0,076 | 0,000 – 0,600 %               |
| Mn                              | 1,05 %      | ± 0,058 | 0,600 – 0,900 %               |
| Cr                              | 0,620 %     | ± 0,012 | 0,000 – 0,250 %               |
| C                               | 0,382 %     | ± 0,045 | 0,370 – 0,440 %               |

|    |         |         |                 |
|----|---------|---------|-----------------|
| Al | —       | < 0,009 | 0,000 – 0,000 % |
| Mo | —       | < 0,036 | 0,000 – 0,100 % |
| Cu | 0,026 % | ± 0,006 | 0,000 – 0,350 % |
| Pb | —       | < 0,013 | 0,000 – 0,000 % |
| Nb | —       | < 0,019 | 0,000 – 0,000 % |
| V  | —       | < 0,005 | 0,000 – 0,030 % |
| Ti | —       | < 0,001 | 0,000 – 0,000 % |
| Ni | —       | < 0,055 | 0,000 – 0,300 % |

\* SAD, oznaka čelika prema AISI 1040

**Tablica 9. Kemijski sastav dobiven LIBS metodom za uzorak 2**

| <b>Čelik 13CrMoSi5-5* (vjerojatnost 87,9 %)</b> |                    |              |                                      |
|---|--------------------|--------------|--------------------------------------|
| <b>Kemijski element</b>                         | <b>Maseni udio</b> | <b>+ / -</b> | <b>Referentne vrijednosti legure</b> |
| Fe  | 95,84 %            | ± 0,263      | 0,000 – 100 %                        |
| Si  | 1,76 %             | ± 0,101      | 0,000 – 0,600 %                      |
| Cr  | 1,34 %             | ± 0,021      | 0,600 – 0,900 %                      |
| Mn  | 0,590 %            | ± 0,038      | 0,000 – 0,250 %                      |
| C   | 0,248 %            | ± 0,072      | 0,370 – 0,440 %                      |
| Mo  | 0,121 %            | ± 0,023      | 0,000 – 0,000 %                      |
| Ni  | —                  | < 0,032      | 0,000 – 0,100 %                      |
| Al  | —                  | < 0,006      | 0,000 – 0,350 %                      |
| Cu  | 0,032 %            | ± 0,006      | 0,000 – 0,000 %                      |
| V   | —                  | < 0,004      | 0,000 – 0,000 %                      |
| Nb  | —                  | < 0,016      | 0,000 – 0,030 %                      |
| Pb  | —                  | < 0,004      | 0,000 – 0,000 %                      |
| Ti  | —                  | < 0,002      | 0,000 – 0,300 %                      |

\* SAD, oznaka čelika prema ASTM-u: A387 Grade 11

### 5.3. Izbor materijala zubi za lopatu bagera

Temeljem provedenog eksperimentalnog dijela i analize kriterija pri izboru materijala za zube koji se nalaze na lopati bagera, zaključak je da se najčešće odabiru niskolegirani čelici s niskim ili srednjim sadržajem ugljika. Pojam niskolegirani označava da je ukupan udio legiranih elemenata manji ili jednak od 5 %, dok se čelici prema sadržaju ugljika dijele na niskougljične (sadržaj ugljika je manji ili jednak 0,25 %), srednjeugljične čelike (sadržaj ugljika od 0,25 % do 0,60 %) i visokougljične čelike (sadržaj ugljika veći od 0,60 %) [42]. Dodavanjem legiranih elemenata poboljšavaju se eksploatacijska i proizvodna svojstva čelika. Kod zubi za lopatu bagera glavni legirni elementi su Cr, Mo i Mn. Upotrebom kroma kao legirnog elementa, postiže se bolja korozijska postojanost, povećava tvrdoću i time povećava otpornost na trošenje. Molibden povećava čvrstoću čelika i povisuje granicu tečenja, a mangan povećava žilavost, otpornost na udarno trošenje i prokaljivost čelika prilikom toplinske obrade. Kako bi se u potpunosti zadovoljili zahtjevi postavljeni na zube za lopatu bagera, među kojima je najvažnija otpornost na trošenje, čelik za zube lopate bagera dodatno prolazi kroz proces toplinske obrade (kaljenje i popuštanje) [4.1.3.1], te se u konačnici nanosi i sloj prevlake [4.1.3.2][49,50].

**Tablica 10. Mehanička svojstva niskolegiriranog čelika za zube za lopatu bagera [49,50]**

| $E / \text{MPa}$ | $\nu$ | $R_e / \text{MPa}$ | $R_m / \text{MPa}$ | $\rho / \text{kg/m}^3$ | HRC |
|------------------|-------|--------------------|--------------------|------------------------|-----|
| 205000           | 0,29  | 784                | 981                | 7845                   | 55  |

Prilikom izrade same lopate bagera i zubi koji se nalaze na njoj, te ostalih dijelova bagera i drugih građevinskih strojeva, često se upotrebljava niskolegirani konstrukcijski čelik martenzitne mikrostrukture, komercijalnog naziva Hardox čelik, kojeg karakterizira visoka otpornost na trošenje u kombinaciji s visokom čvrstoćom. Nedostatak ove vrste čelika jest niža korozijska postojanost prijašnjih generacija toga čelika, no razvojem novih generacija Hardox čelika postiže se bolja korozijska postojanost. U [Tablica 11] i [Tablica 12] su dostupni kemijski sastav i mehanička svojstva jedne vrste ovoga čelika komercijalnog naziva Hardox Extreme [51].

**Tablica 11. Kemijski sastav Hardox Extreme čelika [51]**

| C      | Mn     | Si     | P       | Cr     | Ni     | Mo     | S       |
|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|
| 0,44 % | 0,49 % | 0,16 % | 0,006 % | 0,83 % | 2,01 % | 0,14 % | 0,002 % |



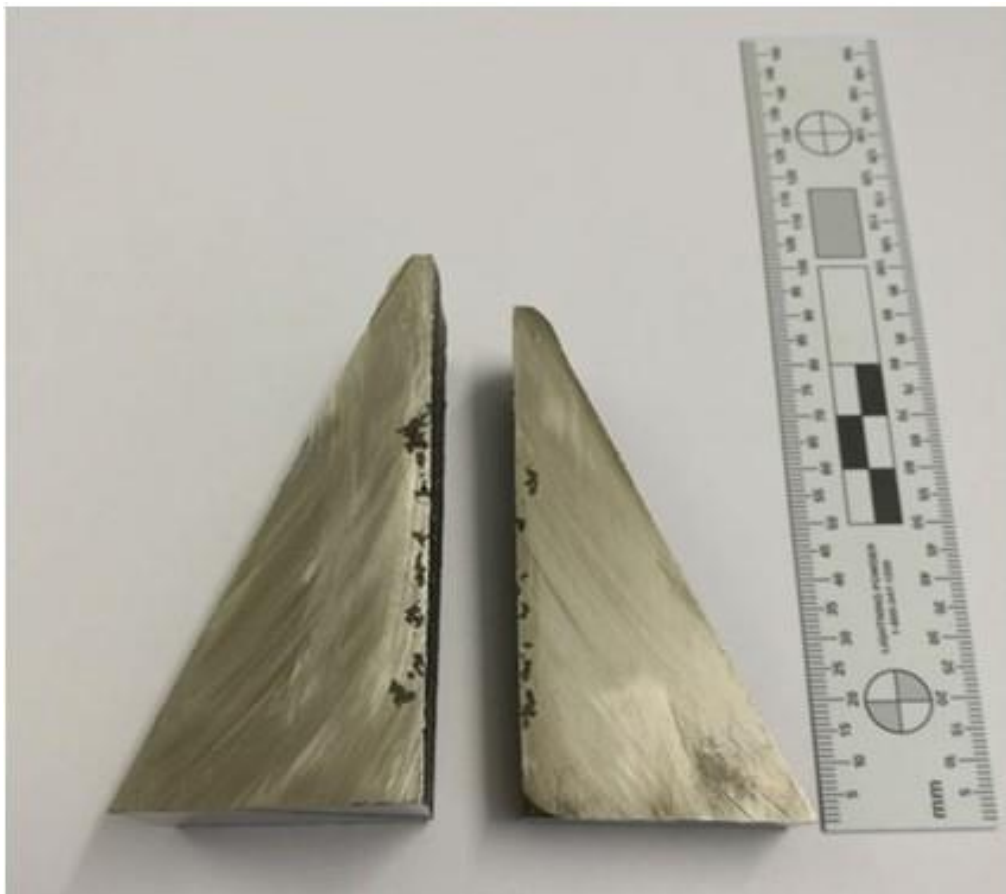
**Tablica 12. Mehanička svojstva Hardox Extreme čelika [51]**

| <b><i>E</i> / MPa</b> | <b><i>R</i><sub>p0,2</sub> / MPa</b> | <b><i>R</i><sub>m</sub> / MPa</b> | <b><i>Z</i> / %</b> | <b>HRC</b> |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------|
| 210000                | 1549                                 | 2413                              | 10,1                | 60         |

Osim čelika, prilikom odabira materijala za zube na lopati bagera često se koristi nodularni lijev koji je toplinski obrađen, to jest izotermički poboljššan. Izotermičkim poboljšavanjem se postiže pojava bainita u mikrostrukturi koji znatno utječe na mehanička svojstva. Izotermički poboljššan nodularni lijev ima izrazito dobar omjer čvrstoće i gustoće, izraženu duktilnost i žilavost, te vrlo dobru otpornost na trošenje koja je vrlo bitna za zube lopate bagera. Osim toga, izotermički poboljššan nodularni lijev ima niske troškove proizvodnje, vrlo dobru sposobnost strojne obrade, te su dijelovi u konačnici lakši zbog manje gustoće [52].

U istraživanju [53] je provedena analiza utjecaja titanija na mikrostrukturu, mehanička svojstva i otpornost na trošenje zubi za lopatu bagera. Uspoređeni zubi su izrađeni od niskolegiranog čelika sa srednjim sadržajem ugljika. Titanij je dodan u koncentraciji od 0,15 % i 0,20 % prilikom lijevanja. Dobiveni lijev je nakon toga normaliziran, kaljen i popušten kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura. Rezultati ispitivanja pokazali su da zubi koji sadrže 0,15 % Ti imaju bolja mehanička svojstva i otpornost na trošenje u odnosu na zube koji ne sadrže titanij u svome kemijskom sastavu, a razlog tomu je stvaranje karbida uzrokovanih dodatkom titanija. Kod zubi s 0,20 % Ti došlo je do formacije vrlo tvrdih i krhkih TiN čestica koje su dovele do značajnog pada čvrstoće i istezljivosti zuba, te tako ne zadovoljavaju tražena funkcionalna i eksploatacijska svojstva [53].

Iako je gotovo nemoguće zamisliti odabir keramike kao materijala za zube koji se nalazi na lopati bagera, zbog njezine krhkosti, upotreba keramičkih čestica prilikom izrade zuba za lopatu bagera u budućnosti bi mogla imati veliku upotrebu. Prethodno zagrijane čestice keramike dodaju se rastaljenom čeliku u kalupu prilikom lijevanja u prethodno predodređena područja kalupa, što omogućava niža gustoća keramike. Ovim načinom se smanjuje sklonost pucanju veznog sloja između keramike i čelika. Dobivena površina sadrži keramičke čestice koje znatno povećavaju otpornost na trošenje, dok jezgra ostaje žilava, to jest otporna na udarce. Povećanjem otpornosti na trošenje povećava se i životni vijek ovih dijelova, a time dolazi do uštede novčanih sredstava [54].



Slika 35. Presjek vrha zuba za lopatu bagera lokalno ojačanog keramičkim česticama [54]

## 6. ZAKLJUČAK

Još od drevnih vremena, moć i razvijenost civilizacije pokazivala se gradnjom nevjerojatnih građevina poput piramida, arena i hramova. Moderne građevine poput mostova, tornjeva i željeznica simboliziraju tehnološki napredak današnje civilizacije. Neizostavan dio u današnjoj modernoj gradnji su građevinski strojevi, čiji izum i razvoj pomiču granice u gradnji svakodnevno.

Građevinska mehanizacija izložena je velikim opterećenjima u vrlo zahtjevnim i agresivnim radnim uvjetima, te se prilikom konstruiranja novih i poboljšavanja postojećih strojeva ti uvjeti i zahtjevi moraju zadovoljiti. Važna karika u lancu konstruiranja proizvoda jest izbor materijala. Pravilnim izborom materijala postižu se bolja uporabna svojstva proizvoda, veća sigurnost konstrukcije, privlačan izgled i niža cijena gotovog proizvoda. To je ostvarivo i izvedivo ukoliko se zadovolje osnovne skupine zahtjeva za izbor materijala prilikom razvoja proizvoda.

U ovom završnom radu je opisan proces izbora materijala za zube koji se nalaze na vrhu lopate. Ti zubi su potrošni dio lopate koja se najčešće nalazi i upotrebljava na građevinskom stroju bageru. Na početku rada nabrojane su i opisane vrste građevinske mehanizacije i njihove funkcije, te vrste i podvrste građevinskog stroja – bagera. Detaljno su opisani hidraulični bageri kao najvažnija i najčešća vrsta bagera u upotrebi – njihovi dijelovi, vrsta i način opterećenja, princip rada i podjela. Lopata je najčešći radni priključak hidrauličnog bagera koji se koristi prilikom kopanja. Funkcija zubi je da omekšaju tlo i smanje otpor kopanja, no za vrijeme kopanja izloženi su velikim opterećenjima, udarcima i trošenju uz prisutnost korozivne agresivne okoline (tlo i atmosfera). Ti zubi su potrošni dio bagera koji je podložan čestom mijenjanju, stoga je važan proces izbora materijala za zube koji se nalaze na vrhu lopate. Izbor materijala proveden je postupno kroz analizu svih osnovnih skupina zahtjeva, te je na temelju tih zahtjeva utvrđeno da su najvažniji zahtjevi prilikom izbora materijala zubi za lopatu bagera: otpornost na trošenje, korozivna postojanost, te kombinacije duktilnost i čvrstoće (žilavost). Materijal koji posjeduje svojstva koja odgovaraju traženim zahtjevima jest čelik.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedena je analiza kemijskog sastava jednog novog zuba i jednog potrošenog zuba za lopatu bagera. Analiza je provedena dvjema metodama za svaki uzorak, a korištene metode su rendgenska fluorescencijska spektroskopija (XRF metoda) i laserski inducirana probojna spektroskopija (LIBS metoda). Dobiveni rezultati su potvrdili da je materijal uzoraka niskolegirani čelik s niskim ili srednjim sadržajem ugljika. Dodavanjem određenih legiranih elemenata postignuta su tražena svojstva, od kojih su najvažniji elementi

mangan, krom i molibden. Pregledom dostupnih informacija na tržištu, proizvode se i zubi od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, koji uz nešto nižu cijenu imaju i niži vijek trajanja i ograničenost uporabe u određenim uvjetima. Sva dostupna istraživanja vezana uz razvoj materijala za zube lopate bagera kreću se u smjeru u kojem se i dalje upotrebljava čelik, no uz dodatke različitih legirnih elemenata poput titanija ili dodatkom čestica poput keramike čeliku u rastaljenom stanju. Zaključak na temelju svega navedenog je da je čelik dovoljno dobar, a pritom i ekonomičan izbor materijala za zube koji se koriste na lopati bagera.

## LITERATURA

- [1] mehanizacija - Hrvatska enciklopedija [Internet]. (pristupljeno: 07/23/2024). Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/mehanizacija>
- [2] What is the importance of Construction Machinery? - Jaypee India Limited [Internet]. (pristupljeno: 07/23/2024). Dostupno na: <https://www.jaypee.in/importance-of-construction-machinery/>
- [3] 5 main types of earthmoving equipment and when to use them - constructionsales.com.au [Internet]. (pristupljeno: 07/23/2024). Dostupno na: <https://www.constructionales.com.au/editorial/details/5-main-types-of-earthmoving-equipment-and-when-to-use-them-114299/>
- [4] 6 Types of Heavy Equipment and Their Uses [Internet]. (pristupljeno: 07/23/2024). Dostupno na: <https://gocodes.com/heavy-equipment-types/>
- [5] Linarić Z. Leksikon osnovne građevinske mehanizacije. (pristupljeno: 07/23/2024); Dostupno na: <http://nazivlje.hr/uploads/files/344fb33e163493d729aa5ce31bfa7874.pdf>
- [6] Guide to Excavator Attachments: Types, Uses, & Selection Tips - HAWK Excavator [Internet]. (pristupljeno: 07/24/2024). Dostupno na: <https://hawkexcavator.com/specs-brochures/guide-to-excavator-attachments/>
- [7] bager - Hrvatska enciklopedija [Internet]. (pristupljeno: 07/29/2024). Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/bager>
- [8] The 10 Biggest Excavators in the World | BigRentz [Internet]. (pristupljeno: 07/29/2024). Dostupno na: <https://www.bigrentz.com/blog/biggest-excavator>
- [9] Građevinski strojevi [Internet]. (pristupljeno: 07/31/2024). Dostupno na: <https://preventa.hr/zastita-na-radu-upit/rad-na-siguran-nacin-s-gradevinskim-strojevima-gradevinski-strojevi>
- [10] Types Of Dragline Excavators. What are the types of Dragline... | by Whobuysheavyequipment | Medium [Internet]. (pristupljeno: 07/31/2024). Dostupno na: <https://medium.com/@whobuysheavyequipment21/types-of-dragline-excavators-f0220632793a>
- [11] How Cutter Suction Dredging works | Damen Shipyards - YouTube [Internet]. (pristupljeno: 08/01/2024). Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=Ho427Fixap8>
- [12] Ceulemans' Large Hitachi Excavators Aid Flood Protection | The HeavyQuip Magazine [Internet]. (pristupljeno: 07/31/2024). Dostupno na:

- <https://www.heavyquipmag.com/2023/05/06/ceulemans-large-hitachi-excavators-aid-flood-protection/>
- [13] A Guide to Sprockets in Construction Equipment: Types, Functions, Main — EquipmentShare Parts Store [Internet]. (pristupljeno: 08/05/2024). Dostupno na: <https://shop.equipmentshare.com/blogs/parts-in-depth/sprockets>
- [14] How Undercarriage Rollers Dictate the Performance of Your Equipment — EquipmentShare Parts Store [Internet]. (pristupljeno: 08/05/2024). Dostupno na: <https://shop.equipmentshare.com/blogs/parts-in-depth/undercarriage-roller-performance>
- [15] 22 Parts of an Excavator - BigRentz [Internet]. (pristupljeno: 08/05/2024). Dostupno na: <https://www.bigrentz.com/blog/parts-of-excavator>
- [16] Mishra SK, Goyal NK, Mukherjee A. Reliability Analysis and Life Cycle Cost Optimization of Hydraulic Excavator. *Journal of Reliability and Statistical Studies*. 2024 Mar 17;297–328. doi: 10.13052/jrss0974-8024.1626
- [17] Simple Crane diagram. - Counterweight - Wikipedia [Internet]. (pristupljeno: 08/06/2024). Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Counterweight#/media/File:Simple\\_Crane\\_diagram..png](https://en.wikipedia.org/wiki/Counterweight#/media/File:Simple_Crane_diagram..png)
- [18] Basic Crane Design principles. E-Crane International [Internet]. 2002 (pristupljeno: 08/06/2024); Dostupno na: <http://www.ecrane-usa.com/products/bcdp.html>
- [19] An K, Kang H, An Y, Park J, Lee J. Methodology of Excavator System Energy Flow-Down. *Energies (Basel)*. 2020 Feb 20;13(4):951. doi: 10.3390/en13040951
- [20] Lubecki M, Stosiak M, Skačkauskas P, Karpenko M, Deptuła A, Urbanowicz K. Development of Composite Hydraulic Actuators: A Review. *Actuators*. 2022 Dec 6;11(12):365. doi: 10.3390/act11120365
- [21] Bittner J, Chmatil M. Hydraulic pressure amplifiers integrated within the hydraulic linear actuators. *MM Science Journal*. 2022 Sep 27;2022(3):5791–4. doi: 10.17973/MMSJ.2022\_10\_2022076
- [22] Janošević D, Pavlović J, Jovanović V, Petrović G. A numerical and experimental analysis of the dynamic stability of hydraulic excavators. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2018 Aug 1;16(2):157. doi: 10.22190/FUME180404015J
- [23] Hydraulic Actuator : Working, Types, Advantages & Its Applications [Internet]. (pristupljeno: 08/07/2024). Dostupno na: <https://www.elprocus.com/hydraulic-actuator/>

- [24] Excavators | The Marvels of Mechanical Engineering - YouTube [Internet]. (pristupljeno: 08/07/2024). Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=NMVhSLtZQnQ>
- [25] 5 Reasons Every Operator Loves Their Volvo Excavator Cab - The Scoop [Internet]. (pristupljeno: 08/07/2024). Dostupno na: <https://volvoceblog.com/5-reasons-every-operator-loves-their-volvo-excavator-cab/>
- [26] Lubecki M, Stosiak M, Skačkauskas P, Karpenko M, Deptuła A, Urbanowicz K. Development of Composite Hydraulic Actuators: A Review. *Actuators*. 2022 Dec 6;11(12):365. doi: 10.3390/act11120365
- [27] HIDROCILINDRI [Internet]. (pristupljeno: 08/10/2024). Dostupno na: [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/19\\_05\\_2015\\_\\_22955\\_HIDRAULI\\_CKI\\_CILINDRI\\_.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/19_05_2015__22955_HIDRAULI_CKI_CILINDRI_.pdf)
- [28] Swing Motor | Kum A Powertech Co., Ltd. [Internet]. (pristupljeno: 08/10/2024). Dostupno na: <http://www.kumapt.com/en/products/others/swing-motor-for-excavator/>
- [29] track plate.png (1502×1502) [Internet]. (pristupljeno: 08/12/2024). Dostupno na: <https://www.fushunspecialsteel.com/wp-content/uploads/2021/06/%E5%B1%A5%E5%B8%A6%E6%9D%BF.png>
- [30] Rubber Track [Internet]. (pristupljeno: 08/12/2024). Dostupno na: [https://www.drbworld.com/industrial/\\_Data/Catalogue/MN0000029.pdf](https://www.drbworld.com/industrial/_Data/Catalogue/MN0000029.pdf)
- [31] Rubber versus steel tracks, which one to pick? | TVH [Internet]. (pristupljeno: 08/12/2024). Dostupno na: <https://www.tvh.com/learning-hub/rubber-versus-steel-tracks-which-one-to-pick>
- [32] Choosing between rubber tracks and steel tracks – Vematrack [Internet]. (pristupljeno: 08/13/2024). Dostupno na: <https://www.vematrack.com/en/blog-en/rubber-tracks-vs-steel-tracks/>
- [33] Help you to read caterpillar excavator model [Internet]. (pristupljeno: 08/12/2024). Dostupno na: <https://www.longreachboom.com/help-you-to-read-caterpillar-excavator-model.html>
- [34] Excavator Sizes: Choosing the Right One for Your Project – BigRentz [Internet]. (pristupljeno: 08/12/2024). Dostupno na: [https://www.bigrentz.com/blog/excavator-sizes?srsId=AfmBOopCqrjxLaTdnIctIIXIz01ME0cStur8d4Q53Ou0p4hcFH\\_-zBt6](https://www.bigrentz.com/blog/excavator-sizes?srsId=AfmBOopCqrjxLaTdnIctIIXIz01ME0cStur8d4Q53Ou0p4hcFH_-zBt6)
- [35] Kubota KX057-4 [Internet]. (pristupljeno: 08/12/2024). Dostupno na: [https://media.kubota.io/uploads/Kubota\\_Excavator-KX057-4.pdf](https://media.kubota.io/uploads/Kubota_Excavator-KX057-4.pdf)

- [36] Filetin T. Izbor materijala pri razvoju proizvoda. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2006.
- [37] Sun Y, Wang Y, Wang L, Li C, Tang L, Wang D, et al. Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket. *Applied Sciences*. 2023 Oct 20;13(20):11507. doi: 10.3390/app132011507
- [38] EXCAVATOR BUCKET TOOTH WEAR ANALYSI [Internet]. (pristupljeno: 08/18/2024). Dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7755328>
- [39] Dong Z, Jiang F, Tan Y, Wang F, Ma R, Liu J. Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery. *Lubricants*. 2023 Jun 8;11(6):253. doi: 10.3390/lubricants11060253
- [40] Suryo SH, Bayuseno AP, Jamari J, Wahyudi AI. Analysis of Rake Angle Effect to Stress Distribution on Excavator Bucket Teeth Using Finite Element Method. *Civil Engineering Journal*. 2018 Jan 4;3(12):1222. doi: 10.28991/cej-030952
- [41] Forged Bucket Teeth, Excavator Bucket Teeth Forging [Internet]. (pristupljeno: 08/18/2024). Dostupno na: <https://www.dropforging.net/forged-bucket-teeth.html>
- [42] Stupnišek Mladen, Cajner Franjo. Osnove toplinske obradbe metala. Zagreb; 2001.
- [43] Elshaer RN, Ibrahim KM, Ibrahim MM, Sobh AS. Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Carbon Steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2021 Aug 6;10(4):485–95. doi: 10.1007/s13632-021-00757-3
- [44] Singla S, Kang AS, Grewal JS, Cheema GS. Wear Behavior of Weld Overlays on Excavator Bucket Teeth. *Procedia Materials Science*. 2014;5:256–66. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.265
- [45] HRC Steel - Price - Chart - Historical Data - News [Internet]. (pristupljeno: 09/02/2024). Dostupno na: <https://tradingeconomics.com/commodity/hrc-steel>
- [46] Grilec K, Jakovljević S. Tribologija, autorizirana predavanja. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [47] Handheld XRF Gun Analyzer | X-ray Fluorescence | X-MET8000 | Hitachi High-Tech [Internet]. (pristupljeno: 08/21/2024). Dostupno na: <https://hha.hitachi-hightech.com/en/product-range/products/handheld-xrf-libs-analyzers/handheld-xrf-analyzers>



- [48] Z-903 | SciAps [Internet]. (pristupljeno: 08/21/2024). Dostupno na:  
<https://www.sciaps.com/products/libs/z-903>
- [49] Suryo SH, Bayuseno AP, Jamari J, Ramadhan MAR. Analysis of AISI material power of AISI 4140 bucket teeth excavator using influence of abrasive wear. In 2018. p. 030022. doi: 10.1063/1.5042942
- [50] Suryo SH, Bayuseno AP, Jamari J, Wahyudi AI. Analysis of Rake Angle Effect to Stress Distribution on Excavator Bucket Teeth Using Finite Element Method. *Civil Engineering Journal*. 2018 Jan 4;3(12):1222. doi: 10.28991/cej-030952
- [51] Białoברzeska B, Jasiński R, Konat Ł, Szczepański Ł. Analysis of the Properties of Hardox Extreme Steel and Possibilities of Its Applications in Machinery. *Metals (Basel)*. 2021 Jan 17;11(1):162. doi: 10.3390/met11010162
- [52] Polishetty A. Machinability and microstructural studies on phase transformations in Austempered Ductile Iron. 2012. doi: 10.13140/2.1.3060.1926
- [53] Keleş A, Yildirim M. Improvement of mechanical properties by means of titanium alloying to steel teeth used in the excavator. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020 Oct;23(5):1208–13. doi: 10.1016/j.jestch.2019.12.003
- [54] Biermann H, Aneziris CG, editors. *Austenitic TRIP/TWIP Steels and Steel-Zirconia Composites*. Vol. 298. Cham: Springer International Publishing; 2020. doi: 10.1007/978-3-030-42603-3

## **PRILOZI**

- I. Rezultati ispitivanja dobivenih XRF i LIBS metodom za uzorak 1
- II. Rezultati ispitivanja dobivenih XRF i LIBS metodom za uzorak 2

## I. Rezultati ispitivanja LIBS metodom za uzorak 1



Material Report

09:23 am, 07/17/2024  
AVG #1554**1040** 89.9

2 - 4140 88.8

3 - S1 88.2

INSTRUMENT INFO

SERIAL # Z903-01473

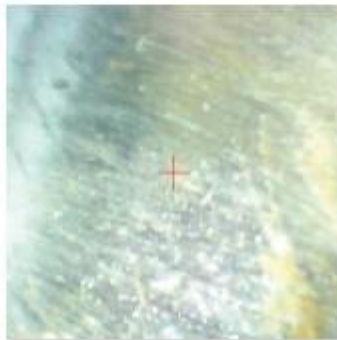
CHEMICAL ELEMENTS

|                         |        |         |              |
|-------------------------|--------|---------|--------------|
| <b>Fe</b><br>Iron       | 96.74% | ± 0.208 | 0.000-100%   |
| <b>Si</b><br>Silicon    | 1.09%  | ± 0.076 | 0.000-0.600% |
| <b>Mn</b><br>Manganese  | 1.05%  | ± 0.058 | 0.600-0.900% |
| <b>Cr</b><br>Chromium   | 0.620% | ± 0.012 | 0.000-0.250% |
| <b>C</b><br>Carbon      | 0.382% | ± 0.045 | 0.370-0.440% |
| <b>Al</b><br>Aluminum   | ND     | < 0.009 | 0.000-0.000% |
| <b>Mo</b><br>Molybdenum | ND     | < 0.036 | 0.000-0.100% |
| <b>Cu</b><br>Copper     | 0.026% | ± 0.006 | 0.000-0.350% |
| <b>Pb</b><br>Lead       | ND     | < 0.013 | 0.000-0.000% |
| <b>Nb</b><br>Niobium    | ND     | < 0.019 | 0.000-0.000% |
| <b>V</b><br>Vanadium    | ND     | < 0.005 | 0.000-0.030% |
| <b>Ti</b><br>Titanium   | ND     | < 0.001 | 0.000-0.000% |
| <b>Ni</b><br>Nickel     | ND     | < 0.055 | 0.000-0.300% |

I. Rezultati ispitivanja XRF metodom za uzorak 1

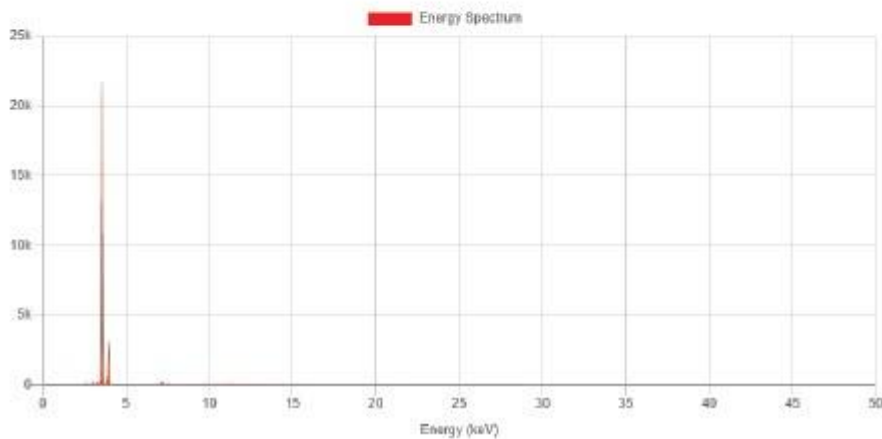
**Measurement name:** **Device:** X-MET XRF Analyzer (804787)  
**Measurement time:** 17.07.2024 **Device serial:** 804787  
**Timestamp:** 1721202763932 **Measurement method:** Low alloy  
**Grades:** C-0.5Mo (1.75), C-1026 (1.83)

| Element | Concentration | MIN      | MAX       | +/-     | Pass/Fail |
|---------|---------------|----------|-----------|---------|-----------|
| Fe      | 96.809 %      | 90.000 % | 100.000 % | 0.077 % |           |
| Si      | 1.251 %       | -        | -         | 0.038 % |           |
| Mn      | 0.973 %       | 0.500 %  | 0.800 %   | 0.037 % |           |
| Cr      | 0.743 %       | -        | 1.000 %   | 0.025 % |           |
| Al      | 0.481 %       | -        | -         | 0.069 % |           |
| Mo      | 0.089 %       | 0.440 %  | 0.650 %   | 0.005 % |           |
| S       | 0.071 %       | -        | -         | 0.003 % |           |
| Pb      | 0.049 %       | -        | -         | 0.026 % |           |
| Cu      | 0.039 %       | -        | -         | 0.010 % |           |
| W       | 0.021 %       | -        | -         | 0.012 % |           |
| P       | 0.014 %       | -        | -         | 0.011 % |           |
| Ti      | 0.013 %       | -        | -         | 0.024 % |           |
| V       | 0.002 %       | -        | -         | 0.008 % |           |
| Nb      | 0.001 %       | -        | -         | 0.002 % |           |
| Zr      | 0.000 %       | -        | -         | 0.002 % |           |
| Ni      | < 0 %         | -        | 1.000 %   | 0.009 % |           |



7/17/2024

1 / 2



## II. Rezultati ispitivanja LIBS metodom za uzorak 2



Material Report

09:37 am, 07/17/2024  
AVG #1574**1.25Cr-.5Mo 87.9**

2 - S1 86.7

3 - S6 83.5

INSTRUMENT INFO

SERIAL #

Z903-01473

## CHEMICAL ELEMENTS

|                         |        |         |              |
|-------------------------|--------|---------|--------------|
| <b>Fe</b><br>Iron       | 95.84% | ± 0.263 | 0.000-100%   |
| <b>Si</b><br>Silicon    | 1.76%  | ± 0.101 | 0.500-1.00%  |
| <b>Cr</b><br>Chromium   | 1.34%  | ± 0.021 | 1.00-1.50%   |
| <b>Mn</b><br>Manganese  | 0.590% | ± 0.038 | 0.300-0.600% |
| <b>C</b><br>Carbon      | 0.248% | ± 0.072 | 0.050-0.200% |
| <b>Mo</b><br>Molybdenum | 0.121% | ± 0.023 | 0.440-0.650% |
| <b>Ni</b><br>Nickel     | ND     | < 0.032 | 0.000-0.300% |
| <b>Al</b><br>Aluminum   | ND     | < 0.006 | 0.000-0.000% |
| <b>Cu</b><br>Copper     | 0.032% | ± 0.006 | 0.000-0.350% |
| <b>V</b><br>Vanadium    | ND     | < 0.004 | 0.000-0.030% |
| <b>Nb</b><br>Niobium    | ND     | < 0.016 | 0.000-0.000% |
| <b>Pb</b><br>Lead       | ND     | < 0.004 | 0.000-0.000% |
| <b>Ti</b><br>Titanium   | ND     | < 0.002 | 0.000-0.000% |

## II. Rezultati ispitivanja XRF metodom za uzorak 2

Measurement name: Device: X-MET XRF Analyzer (804787)  
 Measurement time: 17.07.2024 Device serial: 804787  
 Timestamp: 1721202759608 Measurement method: Low alloy  
 Grades: 1.25Cr-0.5Mo (1.39), C-0.5Mo (2.63)

| Element | Concentration | MIN      | MAX       | +/-     | Pass/Fail |
|---------|---------------|----------|-----------|---------|-----------|
| Fe      | 95.900 %      | 90.000 % | 100.000 % | 0.082 % |           |
| Si      | 1.553 %       | -        | -         | 0.042 % |           |
| Cr      | 1.486 %       | 1.000 %  | 1.500 %   | 0.035 % |           |
| Mn      | 0.821 %       | 0.300 %  | 0.800 %   | 0.037 % |           |
| Al      | 0.144 %       | -        | -         | 0.052 % |           |
| Mo      | 0.110 %       | 0.420 %  | 0.650 %   | 0.005 % |           |
| Ni      | 0.107 %       | -        | 1.000 %   | 0.021 % |           |
| Pb      | 0.107 %       | -        | -         | 0.026 % |           |
| S       | 0.062 %       | -        | -         | 0.003 % |           |
| P       | 0.052 %       | -        | -         | 0.011 % |           |
| Cu      | 0.035 %       | -        | -         | 0.009 % |           |
| Ti      | 0.008 %       | -        | -         | 0.024 % |           |
| Nb      | 0.004 %       | -        | -         | 0.002 % |           |
| W       | 0.004 %       | -        | -         | 0.011 % |           |
| V       | 0.003 %       | -        | -         | 0.008 % |           |
| Zr      | 0.002 %       | -        | -         | 0.002 % |           |



7/17/2024

1 / 2

