Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje

Lukšić, Helena

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:495620

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Helena Lukšić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica: Studentica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing. Helena Lukšić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na prihvaćanju mentorstva, razumijevanju, usmjeravanju, stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Helena Lukšić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Helena Lukšić** Mat. br.: 0035212926

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural steels for increased abrasion wear resistance**

Opis zadatka:

Prekomjerno trošenje je česti uzrok dotrajavanja ne samo alata već i dijelova strojeva koji su tijekom eksploatacije tribolološki opterećeni, pri čemu je abrazijski mehanizam trošenja najviše zastupljen. Brzina i intenzitet abrazijskog trošenja ovise o nizu čimbenika, a neki od njih su povezani sa sastavom i strukturom samog materijala. Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje ciljano su razvijeni, a koriste se za konstrukcijske dijelove i dijelove strojeva koji su u svom radu izloženi dinamičkom kontaktu s tvrđim materijalima.

U radu je potrebno dati pregled razvoja konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje te opisati njihov sastav, strukturu, mehanička, tribološka i tehnološka svojstva. Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Zadatak zadala:
Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

POPIS OZNAKA VI

POPIS KRATICA VII

SAŽETAK VIII

SUMMARY IX

1. UVOD 1

2. TROŠENJE 3

2.1. Mehanizmi trošenja 3

2.2. Abrazija 3

2.2.1. Mehanizmi abrazijskog trošenja 4

2.3. Otpornost na abraziju 11

3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI 14

3.1. Opći konstrukcijski čelici 15

3.1.1. Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije 15

3.1.2. Čelici za strojogradnju 17

4. KONSTRUKCIJSKI ČELICI POBOLJŠANE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE 19

4.1. Hadfieldov čelik 19

4.2. Razvoj konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje 21

4.3. Kemijski sastav Hardox čelika 23

4.4. Primjena Hardox čelika 25

5. ISPITIVANJA PROVEDENA NA ČELIKU HARDOX 500 26

5.1. Usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje čelika Hardox 500 i 20MnCr5 [18] 26

5.1.1. Metodologija ispitivanja 26

5.1.2. Rezultati ispitivanja....32
5.1.3. Zaključak ispitivanja....35
5.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje čelika S235, S355, C45, X5CrNi18–10 i Hardox 500, upotrebom abraziva od granata, korunda i karborunda [19]....36
5.2.1. Metodologija ispitivanja....36
5.2.2. Rezultati ispitivanja....39
5.2.2.1. Usporedna analiza svojstava abraziva i uzoraka čelika....39
5.2.2.2. Mikrostruktura i tvrdoća ispitivanih materijala....41
5.2.2.3. Rezultati ispitivanja abrazivnog trošenja....43
5.2.3. Zaključak ispitivanja....48
6. ZAKLJUČAK....49
LITERATURA....51

POPIS SLIKA

Slika 1. Jedinični događaj abrazije [1] 4
Slika 2. Abrazija u dodiru dvaju tijela a) i triju tijela b) [4] 5
Slika 3. Shematski prikaz mikrobrazdanja [3] 6
Slika 4. Shematski prikaz mikrorezanja [3] 6
Slika 5. Shematski prikaz mikronaprsnuća [3] 7
Slika 6. Shematski prikaz mikroumora [3] 7
Slika 7. "Čista" abrazija [1] 8
Slika 8. Selektivna abrazija [1] 9
Slika 9. "Nulta" abrazija [1] 10
Slika 10. Otpornost na abrazijsko trošenje ovisno o tvrdoći materijala [5] 12
Slika 11. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama materijala i abraziva [1] 13
Slika 12. Uobičajena toplinska obrada Hadfield čelika [11] 20
Slika 13. Mikrostruktura Hadfield čelika nakon dozrijevanja pri različitim povećanjima [11] 20
Slika 14. Primjena Hardox čelika u pogonu za proizvodnju cementa [13] 25
Slika 15. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje [18] 27
Slika 16. Uređaj MTS 322 na kojem je provedeno statičko vlačno ispitivanje [18] 27
Slika 17. Mikrostruktura čelika Hardox 500 [18] 29
Slika 18. Mikrostruktura čelika 20MnCr5 [18] 29
Slika 19. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „*pin-on-disc*“ [18] 30
Slika 20. Uzorak a) i protuuzorak b) prije ispitivanja [18] 31
Slika 21. Uzorak a) i protuuzorak b) nakon ispitivanja [18] 32
Slika 22. Promjena koeficijenta trenja za čelik Hardox 500 [18] 32
Slika 23. Promjena koeficijenta trenja za čelik 20MnCr5 [18] 33
Slika 24. Površina čelika Hardox 500 nakon ispitivanja, x50 [18] 34
Slika 25. Površina čelika 20MnCr5 nakon ispitivanja, x50 [18] 34
Slika 26. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje [19] 37
Slika 27. Raspodjela veličina abrazivnih čestica [19] 40
Slika 28. Morfologija abrazivnih materijala: a) granat, b) korund, c) karborund [19] 41
Slika 29. Mikrostruktura ispitivanih materijala [19] 42
Slika 30. Ovisnost prosječnog gubitka mase o vrsti abraziva [19] 43

Slika 31. Ovisnost normalizirane otpornosti na abrazijsko trošenje o različitoj vrsti abraziva [19] 44
Slika 32. Gubitak mase čelika u ovisnosti o tvrdoći čelika [19] 45
Slika 33. Utjecaj tvrdoće abraziva na rezultate abrazijskog trošenja [19] 46
Slika 34. Utjecaj sadržaja ugljika na otpornost na abrazijsko trošenje ugljičnih čelika S235JR, S355J2 i C45 [19].....46
Slika 35. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima [19].....47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tvrdoća pojedinih abraziva te faznih konstituenata [3] 11
Tablica 2. Najpoznatiji čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje [13, 14, 15, 16] .22
Tablica 3. Kemijski sastav čelika Hardox 500 [17] 24
Tablica 4. Mehanička svojstva čelika Hardox 500 [17] 24
Tablica 5. Mehanička svojstva čelika Hardox 500 i 20MnCr5 [18] 28
Tablica 6. Kemijski sastav Hardox 500 [18].....28
Tablica 7. Kemijski sastav 20MnCr5 [18].....28
Tablica 8. Dobivene vrijednosti nakon ispitivanja abrazijskog trošenja [18].....33
Tablica 9. Svojstva ispitivanih čelika [19].....37
Tablica 10. Svojstva abraziva [19].....40
Tablica 11. Tvrdoća ispitivanih materijala [19].....42
Tablica 12. Otpornost na abrazijsko trošenje ovisno o mikrostrukturi [19] 45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
μ		Koeficijent trenja
A_5	%	Istezljivost
C_e		Ugljični ekvivalent
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
F_N	N	Normalna komponenta sile
F_t	N	Tangencijalna komponenta sile
H_a	HV	Tvrdoća abraziva
H_m	HV	Tvrdoća materijala
I	mg/m^3	Intenzitet abrazijskog trošenja
NDT	°C	Temperatura nulte duktilnosti
R_d	N/mm^2	Dinamička izdržljivost
R_e	N/mm^2	Granica tečenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	Savojna čvrstoća
R_{mt}	N/mm^2	Tlačna čvrstoća
R_{mu}	N/mm^2	Smična čvrstoća
ρ	g/cm^3	Gustoća

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
FEPA	*Federation of European Producers of Abrasives – Savez europskih proizvođača abraziva*
HSS	*High Speed Steel – brzorezni čelik*

SAŽETAK

Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje ciljano su razvijeni za izradu konstrukcijskih dijelova koji su tijekom eksploatacije tribološki opterećeni.

U radu je napravljen pregled razvoja ovih konstrukcijskih čelika, opisan je njihov sastav, struktura, mehanička, tehnološka i tribološka svojstva.

Nadalje, u radu su prikazani i detaljno opisani rezultati dvaju znanstvenih ispitivanja vezanih uz usporedbu abrazijske otpornosti Hardox čelika s drugim konstrukcijskim čelicima. Rezultati su pokazali da otpornost na abrazijsko trošenje ovisi o sastavu i mikrostrukturi materijala, a isto tako i o vrsti i veličini abraziva. Potvrđeno je da Hardox čelik imaju bolju otpornost na abrazijsko trošenje kod većine primijenjenih abraziva.

Ključne riječi: konstrukcijski čelici, abrazijska otpornost, trošenje

SUMMARY

Structural steels with improved resistance to abrasion wear have been purposefully developed for the production of structural parts that are tribologically loaded during exploitation.

This bachelor thesis reviews the development of structural steels, describes their composition, structure, mechanical, technological, and tribological properties.

Furthermore, the thesis presents and describes in detail the results of two scientific investigations related to the comparison of the abrasion resistance of Hardox steels with other structural steels. The results showed that the resistance to abrasion wear depends on the composition and microstructure of the material, as well as on the type and size of the abrasive. Hardox steels have been confirmed to have better abrasion resistance in the majority of the applied abrasives.

Keywords: structural steels, abrasion resistance, wear

1. UVOD

Trošenje materijala je nepoželjan proces koji uzrokuje smanjenje ili prestanak funkcije tehničkih sustava. Trošenje materijala nastaje kao rezultat doticaja materijala s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama pri relativnom gibanju. Mehanizmi, odnosno oblici trošenja su: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Najdominantniji oblik trošenja strojnih dijelova i alata je abrazijsko trošenje. Ne postoji univerzalan materijal koji je otporan na trošenje, no trošenje se može znatno smanjiti pravilnim izborom materijala te konstrukcijskim rješenjima ovisno o tribosustavu.

Otpornost na abrazijsko trošenje usko je povezana s tvrdoćom materijala, odnosno otpornost na abrazijsko trošenje je veća, što je veća vrijednost tvrdoće materijala. Shodno tome, otpornost na abrazijsko trošenje uvelike ovisi o mikrostrukturi materijala. Što je veći udio tvrdih faza u mikrostrukturi čelika, to će otpornost na abrazijsko trošenje biti veća.

Konstrukcijski čelici su najprisutniji suvremeni konstrukcijski materijali. Osim što podnose statička i dinamička, kratkotrajna i dugotrajna opterećenja, vrlo često su izloženi i intenzivnom abrazijskom trošenju. Zadovoljavajuća svojstva ovih čelika postižu se odgovarajućom mikrostrukturom čelika. U pravilu, što je veći udio tvrdih faza, to će abrazijska otpornost biti veća. Osim izloženosti abrazijskom trošenju, konstrukcijski čelici često rade u uvjetima dinamičkog opterećenja, stoga je vrlo važna i dovoljna duktilnost čelika. U jednom materijalu iznimno je teško postići kombinaciju navedenih svojstava, no postoji način na koji se to može uvelike postići.

Kombinacija ovih svojstava postiže se niskolegiranim čelicima s popuštenom martenzitnom mikrostrukturom. Martenzitna struktura na površini osigurava visoku tvrdoću, odnosno otpornost na abrazijski mehanizam trošenja, a popuštanjem se osigurava povišenje žilavosti čelika, odnosno dinamičke izdržljivosti. Popuštanjem martenzita stvaraju se karbidi popuštanja, zaostali austenit pretvara se u martenzit te se snižava udio ugljika u martenzitu, što povoljno utječe na žilavost čelika. Takvi čelici imaju relativno nizak sadržaj ugljika i precizno određene udjele i vrste legirnih elemenata. Također, uz dobru otpornost na abrazijsko trošenje i dobru dinamičku izdržljivost, ovi čelici su dobro zavarljivi i posjeduju visoku čvrstoću i zadovoljavajuću otpornost na krhki lom. Nomenklatura ove vrste čelika nije standardizirana pa se ovakvi čelici pojavljuju pod imenima proizvođača, a njihove specifikacije, vezane uz kemijski sastav i mehanička svojstva, dostupne su samo u informativnim materijalima proizvođača.

Prvi konstrukcijski čelik poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje u Europi proizveden je 1970. godine pod komercijalnim imenom Hardox, švedskog proizvođača SSAB Oxelösund. Hardox čelik je niskougljični čelik s martenzitnom mikrostrukturom, jednostavnog kemijskog sastava te vrlo visoke tvrdoće. Hardox čelik ima vrlo dobra tribološka i mehanička svojstva, no nedostatak ove vrste čelika je loša korozijska postojanost.

2. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [1].

Trošenje se može definirati i kao reakcija materijala na vanjski podražaj koji može biti mehaničko djelovanje ili kombinacija mehaničkog i kemijskog djelovanja.

Brzinu trošenja materijala povećava mehaničko djelovanje prisutnih stranih tijela i kemijsko agresivno djelovanje okoline. Posljedice trošenja su promjene geometrije površina uzajamno pokretnih dijelova. Istraživanja su pokazala kako je preko 50 % zastoja strojarskih sustava izazvano oštećenjima strojarskih pokretnih sklopova trošenjem. Sve vrste trošenja materijala, u većoj ili manjoj mjeri, ubrzava korozija [2].

2.1. Mehanizmi trošenja

Iako postoji velik broj slučajeva trošenja, većina autora smatra da su samo četiri temeljna mehanizma trošenja:

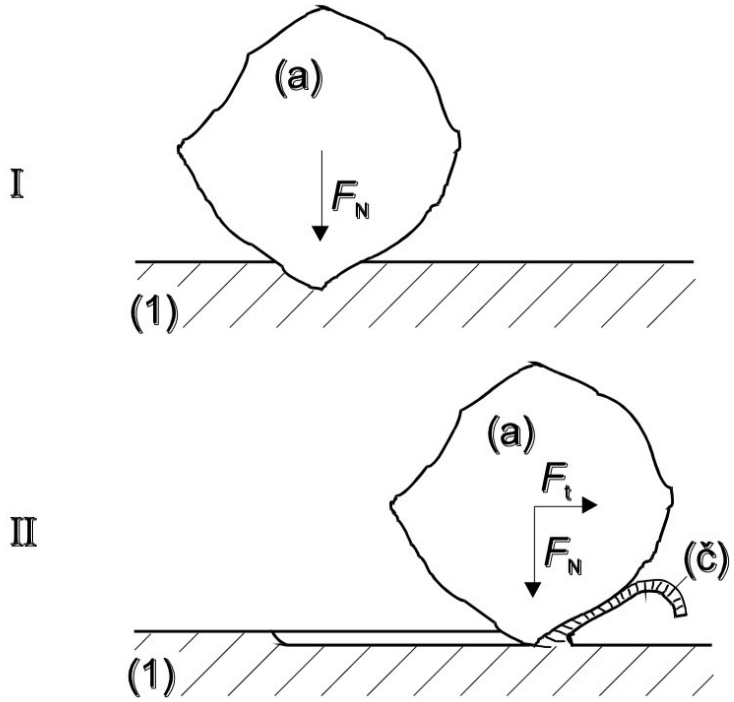
- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Mehanizmi trošenja definiraju se jediničnim događajima. Jedinični događaj predstavlja slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine.

2.2. Abrazija

Abrazija je mehanizam trošenja pri kojem dolazi do istiskivanja materijala koje je izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Abrazijski mehanizam trošenja je najčešći mehanizam trošenja materijala. Karakteristika abrazijskog mehanizma trošenja je prisutnost tvrdih abrazivnih čestica koje su uglavnom mineralnog podrijetla, stoga se ponekad ovo trošenje naziva i mineralno trošenje. Također, abrazijsko trošenje može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja [3].

Jedinični događaj abrazije prikazan je na slici 1.



Slika 1. Jedinični događaj abrazije [1]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

I faza – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N.

II faza – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t [3].

2.2.1. Mehanizmi abrazijskog trošenja

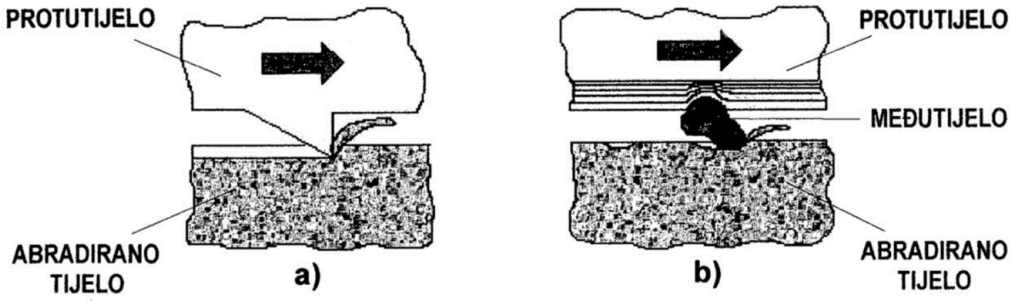
Mehanizam abrazijskog trošenja moguće je proučiti s tri različita stajališta:

- prema strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija
- prema međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine
- prema tvrdoći abraziva i materijala

1. Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija može biti:
   a) abrazija u dodiru dvaju tijela, gdje tribosustav čine abrazivno tijelo i abrazivno protutijelo
   b) abrazija u dodiru triju tijela, gdje tribosustav čine abrazivno tijelo, abrazivno protutijelo i slobodne čestice, odnosno međutijela. Slobodne čestice se slobodno gibaju između abrazivnog tijela i abrazivnog protutijela i djeluju abrazijski.

U slučaju abrazivnog trošenja u dodiru dvaju tijela nastaje znatno više odvojenih čestica nego kod abrazivnog trošenja u dodiru triju tijela. Kod abrazivnog trošenja u dodiru triju tijela slobodne čestice, odnosno međutijela, samo su oko 10 % vremena u dodiru s abrazivnim tijelom, dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.

Abrazija u dodiru dvaju tijela i abrazija u dodiru triju tijela prikazana je na slici 2.

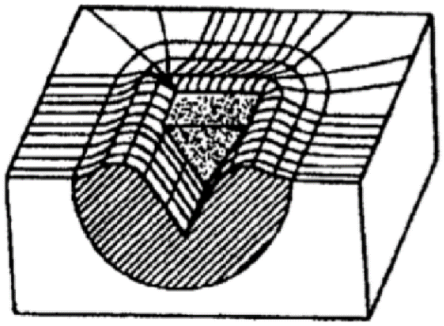


Slika 2. Abrazija u dodiru dvaju tijela a) i triju tijela b) [4]

Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine mogu se razlikovati četiri slučaja trošenja:

a) mikrobrazdanje – odnošenje materijala koje je razmjerno volumenu brazde koja nastaje plastičnom deformacijom uslijed prolaska jedne abrazijske čestice po površini materijala. Rubovi brazde odvajaju se od površine u obliku produkata trošenja. U idealnoj situaciji mikrobrazdanja, abrazivna čestica potisnuti će materijal u stranu u obliku bočnih „grebena“, bez stvaranja produkata trošenja.

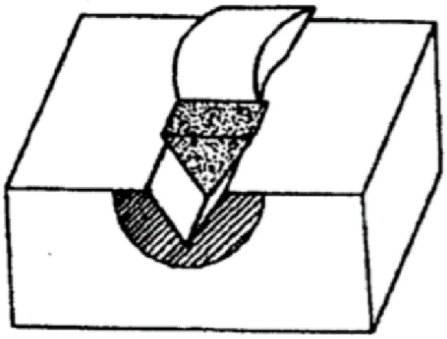
   Mikrobrazdanje je shematski je prikazano na slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz mikrobrazdanja [3]

b) mikrorezanje – odnošenje materijala razmjerno je volumenu zareza formiranog uslijed prolaska abrazivne čestice po površini materijala.

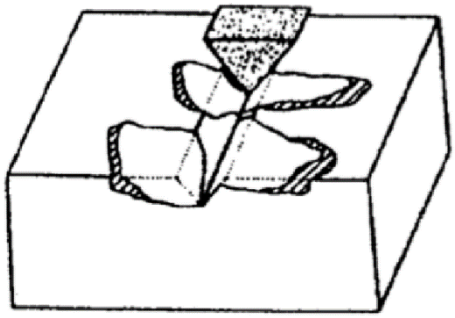
   Shematski prikaz mikrorezanja prikazan je na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz mikrorezanja [3]

c) mikronaprsnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotine. Kod ovog mikromehanizma trošenja s površine se odnose veći djelići materijala.

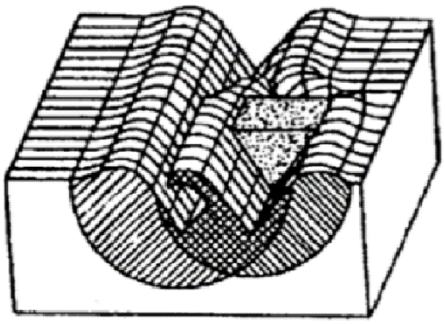
Shematski prikaz na slici broj 5.



Slika 5. Shematski prikaz mikronaprsnuća [3]

d) mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalog uslijed učestalog izmjeničnog opterećenja. Trenutne deformacije kojima je izložen materijal uzrok su nastanka mikropukotina koje svojim širenjem u konačnici dovode do odvajanja dijelova materijala trošene površine. Mikroumor nastaje i uslijed višestrukog i učestalog mehanizma mikrobrazdanja.

Na slici 6. shematski je prikazan mikroumor.

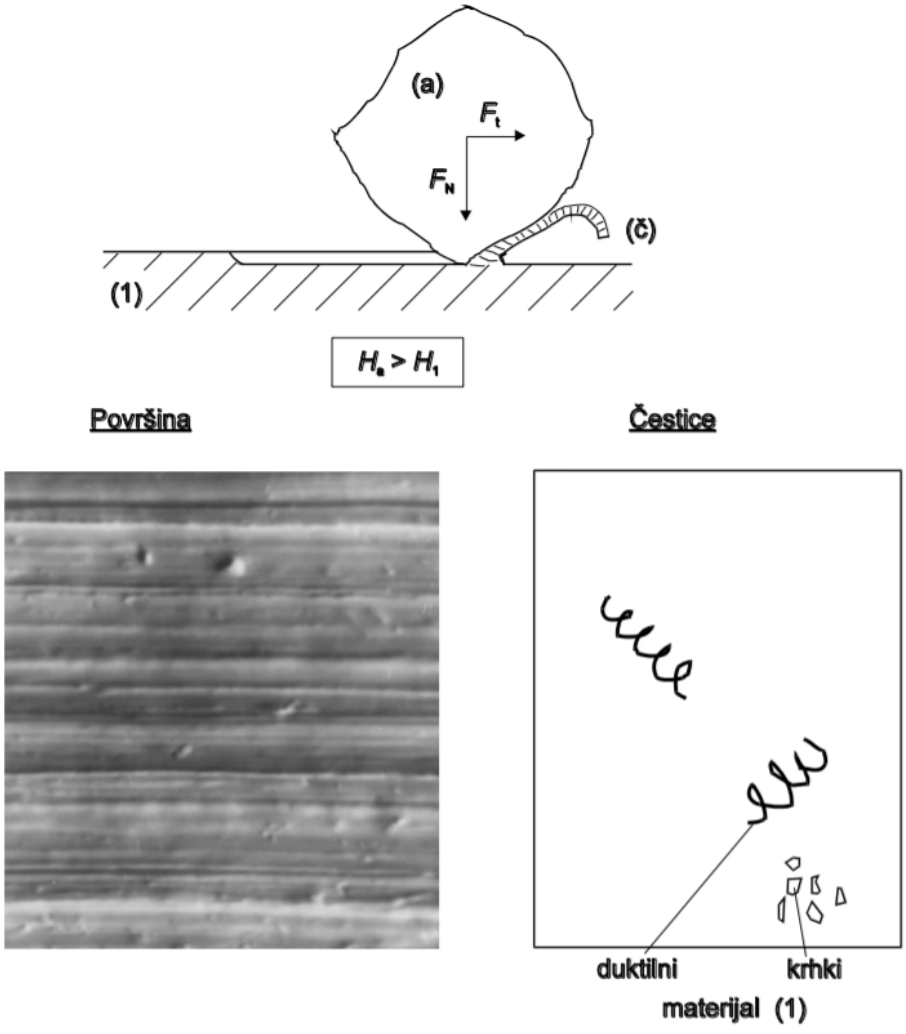


Slika 6. Shematski prikaz mikroumora [3]

2. Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i trošene površine abrazija se može podijeliti na „čistu“ abraziju, selektivnu abraziju i „nultu“ abraziju.

   a) „čista“ abrazija nastaje kada je tvrdoća abraziva (a), H_a, veća od tvrdoće površine trošenog materijala (1), H_1. Površina trošenog materijala je izbrazdana, a oblik čestica trošenja (č) ovisi o abradiranom materijalu. Čestice trošenja mogu biti spiralne strugotine ukoliko je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine, u slučaju krhkog abradiranog materijala.

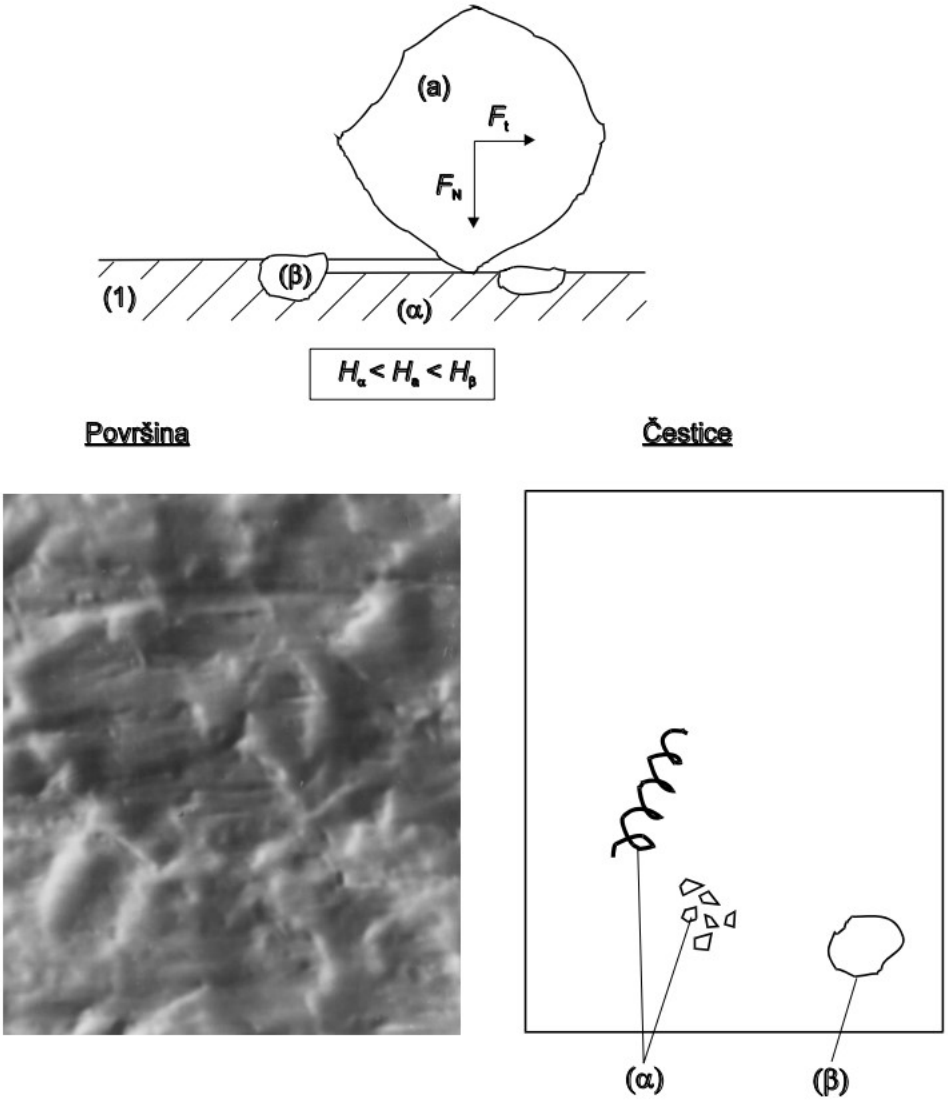
   Shematski prikaz čiste abrazije, izgled abradirane površine te oblici čestica trošenja prikazani su na slici 7.



Slika 7. "Čista" abrazija [1]

b) selektivna abrazija nastaje u višefaznom abradiranom materijalu kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće samo pojedinih faza. Abraziv troši samo zahvaćeni dio mekše faze abradiranog materijala. Površina abradiranog materijala je izbrazdana, s prekidima na područjima gdje se na površini nalaze dijelovi tvrđe faze.

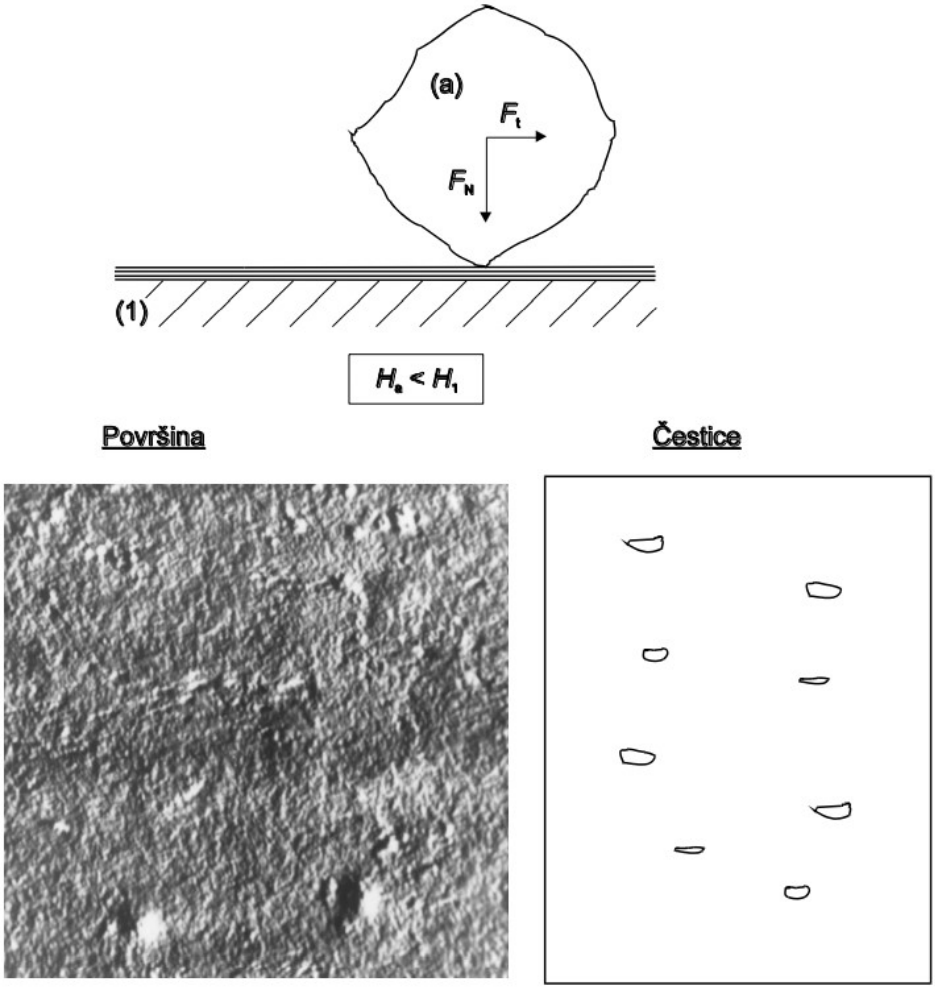
Shematski prikaz selektivne abrazije prikazan je na slici 8.



Slika 8. Selektivna abrazija [1]

c) „nulta“ abrazija nastaje kada je tvrdoća abraziva (a), H_a, manja od tvrdoće cijele površine abradiranog materijala (1), H_1. Trošena površina izgleda polirano, a čestice trošenja su sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja. Nulta abrazija obično se pojavljuje na površinama koje su modificirane ili prevučene slojevima visoke tvrdoće.

Na slici 9. shematski je prikazana nulta abrazija, izgled abradirane površine te oblik čestica trošenja.



Slika 9. "Nulta" abrazija [1]

2.3. Otpornost na abraziju

Međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i površine materijala koji se troši najutjecajniji je čimbenik otpornosti u I. fazi abrazijskog trošenja (prodiranje abraziva u površinu). Najznačajniji čimbenik otpornosti u II. fazi abrazijskog trošenja (istiskivanje materijala i oblikovanje čestice trošenja) jest mehanizam napredovanja pukotine. Pukotina može napredovati krhko ili duktilno, a može doći i do umora površine.

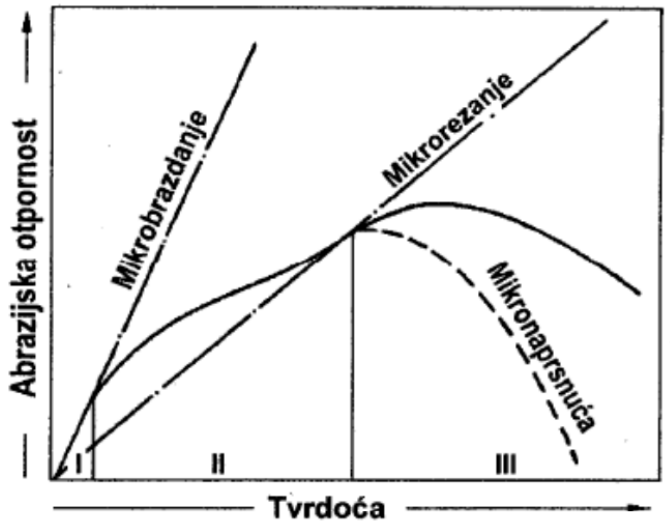
U tablici 1. prikazane su vrijednosti tvrdoće pojedinih abraziva te faznih konstituenata.

Tablica 1. Tvrdoća pojedinih abraziva te faznih konstituenata [3]

Minerali (abrazivi)	Tvrdoća *HV*		Materijali (strukturni konstituenti)
Gips	36		
		70 – 200	Ferit
Vapnenac, $CaCO_3$	140		
Fluorit, CaF_2	190		
		170 – 230	Austenit, 12 % Mn
		250 – 320	Perlit, nelegirani
		250 – 350	Austenit, niskolegirani
Dolomit	370	300 – 460	Perlit, legirani
		300 – 600	Austenit, ljevovi s visokim %C
Staklo	500 – 795	500 – 1010	Martenzit
Apatit	540		
Feldspat	600 – 750		
Kremen	800 – 950	840 – 1100	Cementit
Kvarc, SiO_2	900 – 1750		
		1200 – 1600	Cr-karbid, $(Fe, Cr)_7C_3$
Topaz	1430		
		1300 – 1500	Fe-borid, FeB
		1500	Mo-karbid, Mo_2C
		1650	Cr-karbid, $Cr_{23}C_6$
Korund, Al_2O_3	1800-2100	1800	Cr-karbid, $(Fe, Cr)_{23}C_6$

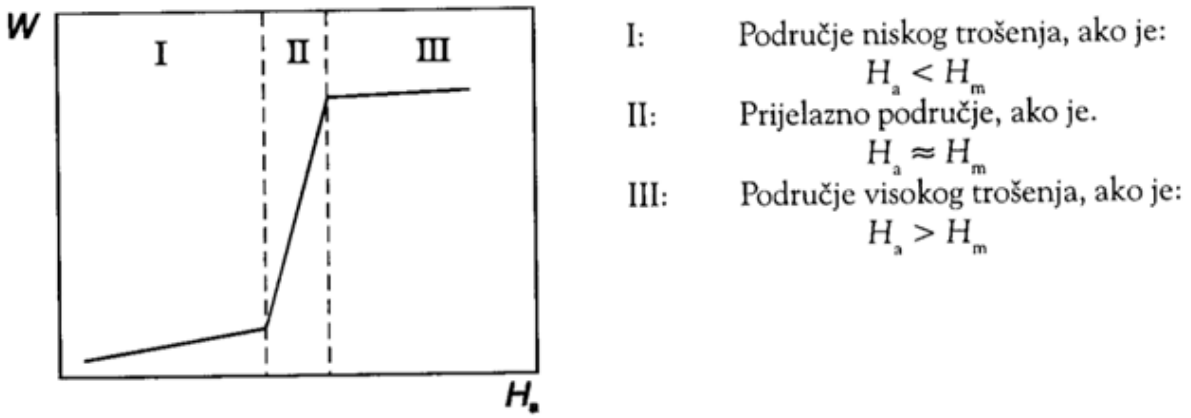
		1600 – 2100	Fe-borid, FeB
		1800 – 2250	Cr-borid, CrB_2
		2000 – 2400	Nb-karbid
		2150	Cr-borid, CrB
		2200	Cr-karbid, Cr_7C_3
		2280	Cr-karbid, Cr_3C_2
		2400	W-karbid, WC
		2700	W-borid, W_2B_5
Karborund, SiC	2600 – 3500	2700 – 3800	Cr-karboborid, $Cr_2(BC)$
		2800 – 2940	V-karbid, VC
		3000	Ti-karbid, W_2C
		3200	Ti-karbid, TiC
		3400	Ti-borid, TiB_2
		3700	B-karbid, B_4C
		3750	W-borid, WB
Dijamant	10000		

Otpornost na abrazijsko trošenje materijala biti će veća, što je tvrdoća materijala veća. Međusobna ovisnost otpornosti na abrazijsko trošenje o tvrdoći materijala prikazana je na slici 10.



Slika 10. Otpornost na abrazijsko trošenje ovisno o tvrdoći materijala [5]

Ovisnost abrazivnog trošenja (W) o tvrdoćama abraziva (H_a) i tvrdoćama površina materijala koja se troši (H_m) ima oblik "S" krivulje, a prikazana je na slici 11.



Slika 11. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama materijala i abraziva [1]

3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika (≤ 2 % C), uz prisutne pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali) te uz eventualni dodatak jednog ili više legirnih elemenata [6]. Čelici se nakon lijevanja taljevine podešenog sastava u kalupe (kokile) oblikuju postupcima deformiranja (valjanjem, kovanjem i sl.) u željeni oblik poluproizvoda (limovi, trake, šipke, cijevi i sl.) [7].

Čelik se legira određenom količinom nekog legirnog elementa da bi se postiglo određeno svojstvo ili kombinacija svojstava. Neminovno se legiranjem neka svojstva i pogoršavaju.

Prema masenim udjelima legirnih elemenata, čelici se dijele na:

- niskolegirane – kod kojih maseni udio ni jednog legirnog elemenata ne prelazi više od 5 % (a ukupni maseni udio svih legirnih elemenata može biti više od 5 %)
- visokolegirane – s masenim udjelom barem jednog legirnog elemenata više od 5 %.

Legirani čelici primjenjuju se u slučajevima gdje se traže neka istaknuta svojstva koja se ne mogu dobiti nelegiranim čelicima – npr. otpornost na trošenje, otpornost na koroziju, prokaljivost, vatrootpornost i sl. [6].

Konstrukcijski čelici koriste se za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju – prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju i transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcije itd. To su osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, vijci, zatici, poklopci i sl. [6].

Zbog mnogostrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva:

a) MEHANIČKA SVOJSTVA: visoka granica razvlačenja, dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama, dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama i dovoljna dinamička izdržljivost;
b) OTPORNOST NA TROŠENJE: što manji gubitak mase, odnosno promjena stanja površine uslijed međusobnog djelovanja dijelova u dodiru;

c) OTPORNOST NA KOROZIJU: korozijska postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama, otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama uz prisutnost različitih plinova;

d) TEHNOLOŠKA SVOJSTVA: zavarljivost, rezljivost, hladna oblikovljivost [6].

3.1. Opći konstrukcijski čelici

Jedna od podskupina konstrukcijskih čelika su opći konstrukcijski čelici. Opći konstrukcijski čelici mogu biti nelegirani (ugljični) čelici čiji je maseni udio ugljika manje od 0,6 % i legirani čelici koji u vrlo malim količinama sadrže neki od legirnih elemenata kao što su krom (Cr), silicij (Si), mangan (Mn), volfram (W) te nikal (Ni).

Opći konstrukcijski čelici najzastupljeniji su u proizvodnji (65 – 80 % mase), a najčešće se koriste prilikom izrade nosivih, pretežno zavarenih konstrukcija velike mase kao što su dizalice, brodske konstrukcije, mostovi, dijelovi vozila te oprema u industriji nafte i plina.

Opći konstrukcijski čelici dijele se na dvije podskupine, a to su: opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije i čelici za strojogradnju [6].

3.1.1. Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije

U primjeni općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije traži se dovoljna nosivost i sigurnost što se postiže dovoljno visokom granicom razvlačenja (R_e), vlačnom čvrstoćom (R_m), tlačnom čvrstoćom (R_{mt}), savojnom čvrstoćom (R_{ms}), smičnom čvrstoćom (R_{mu}) te dinamičkom izdržljivošću (R_d).

Od tehnoloških svojstava općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije najvažnija je zavarljivost. Opći pokazatelj zavarljivosti procjenjuje se iz empiričke formule tzv. ugljičnog ekvivalenta (C_e), a zavarljivost će biti bolja što je vrijednost ugljičnog ekvivalenta manja [8].

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Ni+\%Cu}{10} \qquad (1)$$

Što je manji postotak masenog udjela ugljika i stupanj legiranosti, zavarljivost će biti bolja. Za dobru zavarljivost traži se da vrijednost ugljičnog ekvivalenta bude manja od 0,4 ($C_e < 0,4$). Čelici koji imaju vrijednost ugljičnog ekvivalenta veću od 0,4 zahtijevaju predgrijavanje, što dovodi do sporijeg ohlađivanja nakon postupka zavarivanja.

Od ostalih traženih tehnoloških svojstava potrebno je istaknuti hladnu oblikovljivost i rezljivost. Čelici ove skupine prikladni su za savijanje, kovanje, duboko vučenje i sl.

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije uglavnom su nelegirani (ugljični) čelici s feritno-perlitnom mikrostrukturom. Ako je čelik nakon toplog oblikovanja podvrgnut normalizacijskom žarenju, tada će feritno zrno biti sitnije. Sitnozrnatost mikrostrukture se može poboljšati posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji sprječava rast zrna prilikom kasnijeg ugrijavanja.

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije nisu predviđeni za toplinsku obradu, a razlog tome je nezajamčeni kemijski sastav, nehomogenost u strukturi te viši maseni udio nečistoća nego kod ostalih vrsta čelika. Iako nije propisan kemijski sastav ove vrste čelika, zajamčena su mehanička svojstva. Za cijelu skupinu čelika, vrijednosti mehaničkih svojstava kreću se u rasponima:

$$R_e = 190\ldots370\ \text{N/mm}^2$$

$$R_m = 330\ldots700\ \text{N/mm}^2$$

$$A_5 = 10\ldots28\ \%$$

Vrijednosti granice razvlačenja R_e ovise o dimenzijama, a više su što je viši maseni udio ugljika te što je viši udio perlita u mikrostrukturi. Dodatkom mangana (Mn) i silicija (Si) te ostalih elemenata, vrijednosti čvrstoće se povećavaju, pritom udio mangana ne smije prijeći 1,65 % jer povisuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju. Što je veća vrijednost omjera Mn/C, time je veća i žilavost, odnosno udarni rad loma. To je posebno izraženo pri nižim temperaturama.

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije primjenjuju se pri temperaturama od -40 do +50 °C. Opasnost od pojave krhkog loma povećana je kod primjene na sniženim temperaturama.

Čelici s nižim masenim udjelom ugljika i nečistoća imaju veću otpornost na krhki lom [6].

Standardne oznake čelika sadrže tri dijela: glavnu oznaku, dodatnu oznaku za čelik te dodatne oznake za proizvode od čelika. Osnovna oznaka općih konstrukcijskih čelika počinje slovom „S“, za kojim slijedi troznamenkasti broj koji označava minimalnu granicu razvlačenja (R_e) za područje najmanjih debljina. Nakon glavne oznake slijedi dodatna oznaka za čelik koja predstavlja zajamčenu žilavost pri određenoj temperaturi.

Primjeri označavanja općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije:

- S185 – čelik bez zajamčenih svojstava, za niskoopterećene dijelove ili za armirano-betonske dijelove;
- S235JRG1, S235JRG2 – čelici za statički manje opterećene konstrukcije, spojeni zakovicama i vijcima (slabije zavarljivi);
- S275JRG2, S355JRG2 – zajamčeni udarni rad loma pri +20 °C. Koriste se za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma;
- S235J0G3, S275J0G3, S355J0G3 – zajamčeni udarni rad loma pri 0 °C. Čelici za statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije;
- S235J2G3, S275J2G3, S355J2G3 – zajamčeni udarni rad loma od 27J pri -20 °C. Čelici za statički i dinamički opterećene odgovorne zavarene konstrukcije i pri nižim temperaturama [6].

3.1.2. Čelici za strojogradnju

Čelici za strojogradnju primjenjuju se za strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove (npr. osovine u kliznim ležajima, manje opterećeni zupčanici, vretena) ili prenose sile i momente (npr. vijci, klinovi, zatici, poluge, ručice i sl.). Čelici iz ove skupine imaju nešto viši sadržaj ugljika u odnosu na opće konstrukcijske čelike za nosive konstrukcije, što dovodi do nešto slabije zavarljivosti. Imaju i više vrijednosti vlačne čvrstoće (500…700 N/mm^2), ali nižu istezljivost (10…20 %). Ova podskupina čelika nije namijenjena kaljenju unatoč višem masenom udjelu ugljika.

Osnovna oznaka čelika za strojogradnju počinje slovom „E“, za kojim slijedi troznamenkasti broj koji označuje kolika je minimalna granica razvlačenja (R_e) za područje najmanjih debljina [6].

Primjeri označavanja čelika za strojogradnju:

- E295 s oko 0,3 %C – viša istezljivost, ali niža čvrstoća;
- E335 s oko 0,4 %C;
- E360 s oko 0,5 %C – niža istezljivost, ali viša čvrstoća [6].

4. KONSTRUKCIJSKI ČELICI POBOLJŠANE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE

Od konstrukcijskih čelika, u primjeni se često traži visoka granica razvlačenja, visoka otpornost na trošenje, visoka dinamička izdržljivost, te dobra zavarljivost. Te su značajke velikim dijelom međusobno suprotstavljene i njihova optimalna korelacija u istom materijalu zahtijevala je desetke godina istraživanja. Jedan od prvih čelika kod kojeg su bila zadovoljena ova oprečna svojstva, bio je Hadfieldov visoko-manganski čelik razvijen krajem 19. stoljeća.

4.1. Hadfieldov čelik

Robert Abbott Hadfield, britanski metalurg, 1882. godine patentirao je čelik s udjelom ugljika između 1,00-1,25 % te s udjelom mangana od 12 %, s omjerom ugljik/mangan od 1:10. Tim izumom napravljen je veliki iskorak u razvoju čelika s vrlo visokom otpornošću na abrazijsko trošenje.

Hadfieldov čelik u kemijskom sastavu ima visok sadržaj mangana, a od legirnih elemenata može sadržavati još i silicij, krom, nikal te bakar. Zbog visokog udjela mangana, jakog gamagenog legirnog elementa, ima austenitnu mikrostrukturu. Završna mikrostruktura postiže se žarenjem pri temperaturi od 1000-1050 °C i gašenjem u vodi ili ulju [10].

Čelici s visokim udjelom mangana nisu magnetični, ali u nekim stanjima isporuke (hladno očvrsnuto stanje) pokazuju feromagnetska svojstva. Hadfieldov čelik, uz otpornost na trošenje, otporan je i na udarno opterećenje, no nedostatak je izuzetno teška strojna obrada materijala i loša zavarljivost. S ciljem postizanja lakše strojne obrade, ovaj čelik se žari na 500 °C.

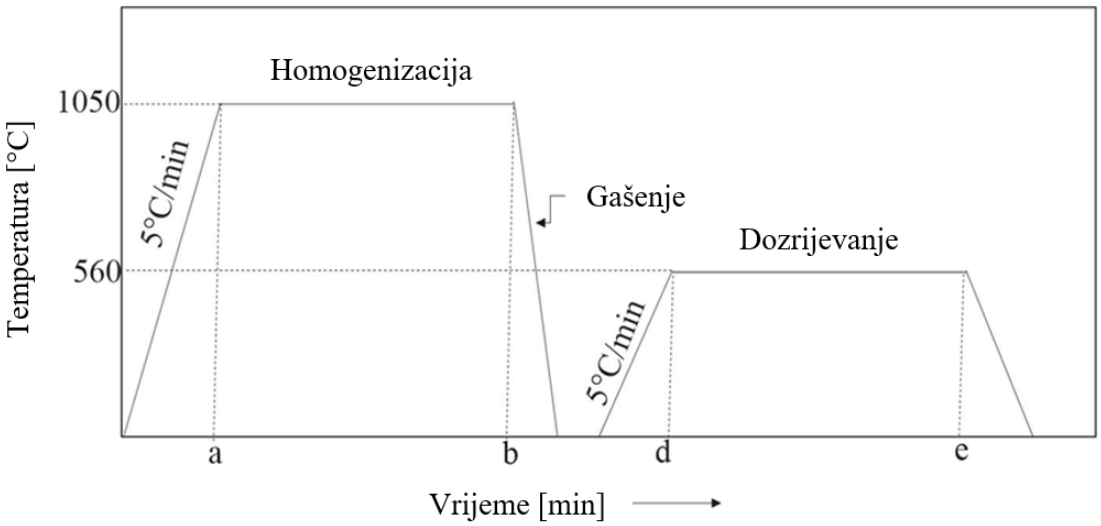
Mikrostruktura Hadfield čelika sastoji se od austenitne rešetke u kojoj su izlučeni precipitati. Sastav precipitata ovisi o parametrima dozrijevanja.

Ova vrsta čelika upotrebljavala se pri konstruiranju željezničkih šina i strojeva za drobljenje stijena.

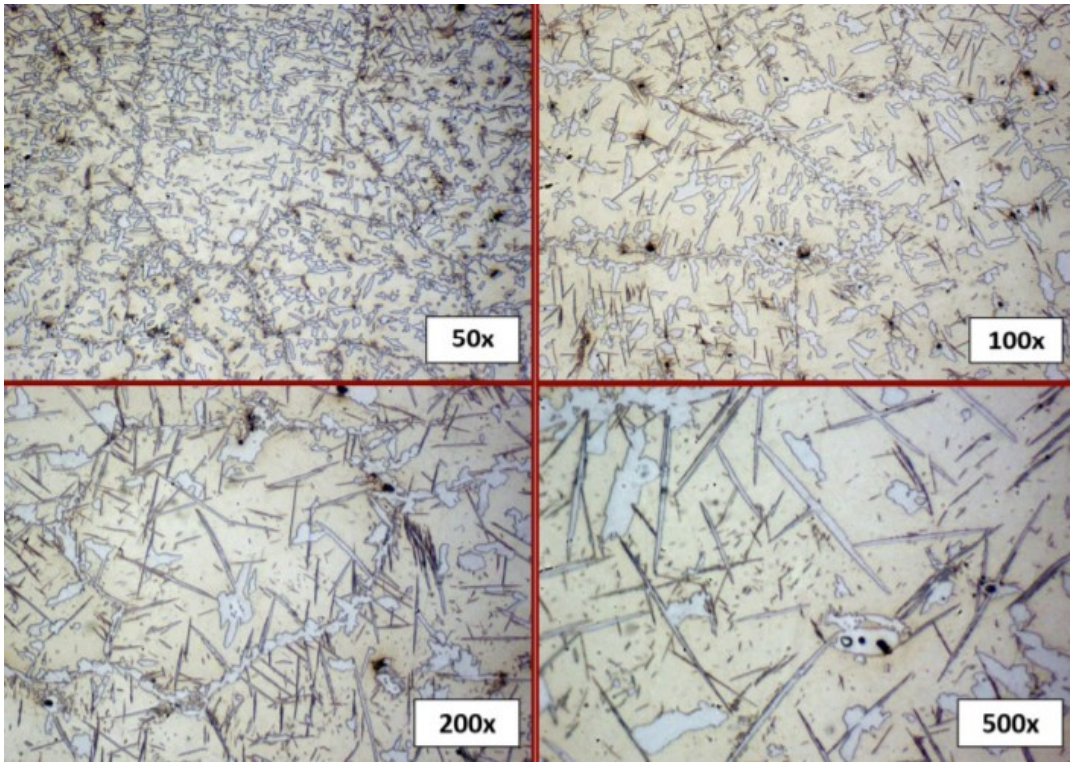
Oznaka za Hadfieldov čelik prema DIN standardu je X120Mn12.

Na slici 12. prikazana je uobičajena toplinska obrada Hadfield čelika. Različitom kombinacijom parametara toplinske obrade mogu se postići različite mikrostrukture i različita svojstva.

Na slici 13. prikazana je mikrostruktura Hadfield čelika nakon homogenizacije i dozrijevanja.



Slika 12. Uobičajena toplinska obrada Hadfield čelika [11]



Slika 13. Mikrostruktura Hadfield čelika nakon dozrijevanja pri različitim povećanjima [11]

4.2. Razvoj konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje

Za vrijeme Drugog svjetskog rata u SAD-u, pod pritiskom zbog oskudice mangana i nikla, počele su se razvijati nove vrste čelika određenih kemijskih sastava i svojstava.

Da bi se povećao kapacitet otvrdnjavanja i stvorili sitni i stabilni precipitati karbida, u čelike su se počele dodavati male količine legirnih elemenata kao što su molibden (Mo), vanadij (V), titan (Ti), bor (B), niobij (Nb) i slični.

Takvi čelici (npr. s 0,16 % C, 1,45 %Mn, 1,48 %Cr, 0,81 %Ni, 0,41 %Mo, 0,0017 %B) dobivaju bainitnu strukturu čak i nakon hlađenja na zraku. Za dobivanje martenzitnih čelika potrebni su složeniji kemijski sastavi, kao i kontroliraniji termo-mehanički tretmani, no martenzitni čelici daju bolja mehanička svojstva nego bainitni čelici. Također, martenzit pokazuje bolja mehanička svojstva od bainita formiranog na istoj temperaturi. Martenzitni čelici imaju povoljan omjer granice razvlačenja (R_e) i vlačne čvrstoće (R_m) te povoljniju temperaturu nulte duktilnosti *(engl. Nil Ductility Temperature – NDT*) [9].

Tribološka svojstva čelika uvelike ovise o mikrostrukturi. Ne postoji samo jedna mikrostruktura otporna na abrazijsko trošenje, već prikladnost čelika s određenom mikrostrukturom ovisi o uvjetima u kojima se koristi. Sposobnost čelika da se odupire gubitku materijala, tj. trošenju, može se postići s nekoliko različitih mikrostruktura. Mnoge vrste čelika, otporne na abrazijsko trošenje, imaju martenzitnu ili uglavnom martenzitnu strukturu. Martenzit je vrlo tvrda mikrostruktura, vrlo velike čvrstoće i tvrdoće, a samim time i vrlo dobre otpornosti na abrazijsko trošenje. Mikrostruktura čelika otpornog na abraziju može se sastojati ili uključivati nekoliko drugih faza. Na primjer, čelik može imati uglavnom ili djelomično bainitnu mikrostrukturu te sadržavati ferit, perlit i/ili zaostali austenit [12].

Desetljećima su se intenzivno razvijali čelici s bainitnom i martenzitnom mikrostrukturom, a 1970. godine proizveden je prvi Hardox čelik (Hardox 400). Krajem 2000. godine već je započeta proizvodnja čelika Hardox HiTuf, šesta generacija ove grupe materijala.

U tablici 2. prikazani su najpoznatiji čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje te postotak ugljika pojedinog čelika.

Tablica 2. Najpoznatiji čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje [13, 14, 15, 16]

SSAB – Švedska		**Hut-Trans Katowice – Poljska**		**Ruukki – Finska**		**Industeel – Belgija**	
Čelik	**%C (max)**	**Čelik**	**%C (max)**	**Čelik**	**%C (max)**	**Čelik**	**%C (max)**
Hardox HiAce	0,26	HTK 700H	0,18	Raex 300	0,18	Relia 400	0,18
Hardox HiTuf	0,20	HTK 700HM	0,20	Raex 400	0,23	Relia 450	0,20
Hardox 400	0,32	HTK 900H	0,18	Raex 450	0,26	Relia 500	0,30
Hardox 450	0,26	HTK 1000H	0,28	Raex 500	0,30		
Hardox 500	0,30						
Hardox 500 Tuf	0,30						
Hardox 550	0,44						
Hardox 600	0,47						
Hardox Extreme	0,47						
Hardox Round Bars	0,32						
Hardox Tubes and Pipes	0,30						
Hardox HiTemp	0,25						

4.3. Kemijski sastav Hardox čelika

Hardox, niskolegirani čelik martenzitne mikrostrukture, postiže svojstva visoke čvrstoće zbog odgovarajućeg sastava legirnih elemenata (nizak udio štetnih primjesa kao što su sumpor i fosfor) po relativno nižoj cijeni u usporedbi s drugim vrstama konstrukcijskih čelika. Mikrostruktura Hardox čelika nakon popuštanja je vrlo homogena i sitnozrnata, s finoigličastim martenzitom i s vrlo sitnim koherentnim karbidima. Hardox čelici međusobno se po sastavu razlikuju ovisno o vrsti i debljini ploče. Prema tome se podešava sadržaj ugljika i legirnih elemenata kao što su nikal (Ni), mangan (Mn), krom (Cr), molibden (Mo) te bor (B) [9].

Nikal (Ni) čiji je sadržaj između 0,25 i 2,50 % ne tvori karbide u čelicima, već se otapa u rešetki željeza supstitucijski te uzrokuje snižavanje temperature austenitizacije stvaranjem prilično širokog područja austenita i ferita.

Mangan (Mn) se dodaje u rasponu od 1,0 do 1,6 %, proširuje područje austenita, utječe na povećanje čvrstoće (očvrsnuće supstitucijskim kristalima mješancima), povoljno djeluje na žilavost, poboljšava prokaljivost te povisuje granicu razvlačenja. Mangan djeluje kao stabilizator austenita, odnosno smanjuje sadržaju ugljika u perlitu i smanjuje zrna ferita tijekom postupka vrućeg valjanja.

Karbidotvorci, kao što su krom (Cr), molibden (Mo) te bor (B), popuštanjem stvaraju karbide popuštanja što rezultira povišenjem tvrdoće, odnosno povišenjem otpornosti na abrazijsko trošenje. Također, ovi legirni elementi povećavaju otpornost na popuštanje čelika.

Dodavanje molibdena (Mo) u količini od 0,25 do 0,60 % rezultira pojavom sekundarne tvrdoće te smanjuje mogućnost pojave krhkosti pri temperaturama od 250 do 400 °C.

U Hardox čelicima dodatak bora (B), niobija (Nb) i titanija (Ti) značajno smanjuju vrijednost ugljičnog ekvivalenta (C_e), odnosno povećavaju sposobnost zavarivanja, istodobno poboljšavajući mehanička svojstva čelika. Dodavanjem niobija (Nb), koji se veže u stabilne nitride, karbonitride i karbide, postiže se sprječavanje rasta zrna austenita pri temperaturama žarenja čelika u svrhu gašenja.

Dodavanje bora (B), koji se otapa u čvrstoj otopini, u vrlo malim količinama rezultira pomicanjem početne i završne krivulje prijelaza austenita, odnosno poboljšava prokaljivost niskougljičnog čelika.

U Hardox čelicima ograničen je udio fosfora na manje od 0,015 % i sumpora na manje od 0,005 %. Količina nemetalnih uključaka koji uzrokuju smanjenje NDT temperature i rezultiraju anizotropijom plastičnih svojstava limova mora biti svedena na najmanju moguću mjeru. [9].

U tablici 3. može se vidjeti kemijski sastav čelika Hardox 500, a u tablici 4. prikazana su mehanička svojstva navedenog čelika.

U tablici 3. navedena je vrijednost ugljičnog ekvivalenta CET i CEV izračunate prema:

$$CET = \%C + \frac{\%Mn+\%Mo}{10} + \frac{\%Cr+\%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{40} \qquad (2)$$

$$CEV = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Cu+\%Ni}{15} \qquad (3)$$

Tablica 3. Kemijski sastav čelika Hardox 500 [17]

Debljina [mm]	**Kemijski sastav**									**CET (CEV)**
2-130	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%B	0,38-0,47 (0,49-0,75)
	0,27-0,30	0,5-0,7	1,6	0,020-0,025	0,010	1,20-1,50	0,025-1,50	0,25-0,60	0,005	

Tablica 4. Mehanička svojstva čelika Hardox 500 [17]

Debljina [mm]	**Tvrdoća [HBW]**	**Žilavost (Charpy KV)**	**Granica razvlačenja R_e, [N/mm^2]**
2-130	450-540	37J / -40 °C	1400

Zaključno, Hardox čelici imaju vrlo dobra tribološka svojstva, no nedostatak je loša korozijska postojanost. Da bi čelik bio korozijski postojan, udio kroma otopljenog u čvrstoj otopini mora biti barem 12 %, što kod Hardox čelika nije slučaj.

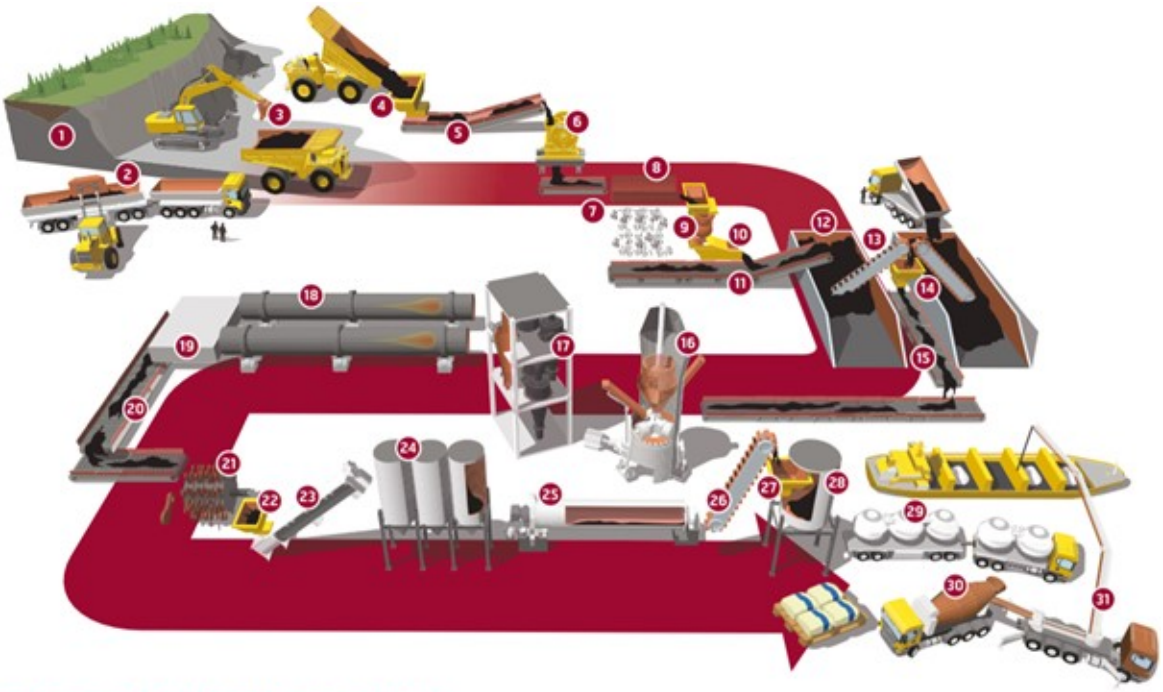
Hardox čelici pogodni su hladno oblikovanje, mogu se savijati, rezati i strojno obrađivati bušenjem, glodanjem i tokarenjem u strogo određenim uvjetima. Hardox čelici mogu se strojno obraditi pomoću brzoreznog HSS čelika (*engl. High Speed Steel – HSS*) ili alata od sinteriranih karbida [17].

4.4. Primjena Hardox čelika

Hardox čelici, vrlo visoke tvrdoće i visoke žilavosti, najčešće se primjenjuju za izradu dijelova gdje je iznimno važna otpornost na abrazijsko trošenje, ali i otpornost na udarna opterećenja. Primjenjuju se za izradu dijelova strojeva u poljoprivredi, građevini, cestogradnji, rudarstvu te za izradu dijelova strojeva u pogonima za recikliranje i proizvodnju cementa.

Kao primjer primjene može se navesti postrojenje za proizvodnju cementa. U cijelom postrojenju za proizvodnju cementa Hardox 500 pruža prednosti zbog vrlo visoke otpornosti na abrazijsko trošenje što omogućava produljen radni vijek strojeva i alata, dok dobra žilavost omogućava savijanje, oblikovanje te zavarivanje bez pucanja.

Na slici 14. prikazano je postrojenje za proizvodnju cementa s naznačenim karakterističnim dijelovima. Mnogi od navedenih dijelova postrojenja sadrže i Hardox čelik.



TOK PROIZVODNJE CEMENTA

1. Površinski kop
2. Utovarivač i samoistovarivač
3. Bager i istovarivač
4. Lijevak za punjenje
5. Trakasti transporter
6. Čeljusna drobilica
7. Guma trakastog transportera
8. Sito drobilice
9. Konusna drobilica
10. Klizna staza
11. Guma trakastog transportera
12. Korpe za skladištenje
13. Kašike elevatora
14. Lijevak za punjenje
15. Guma trakastog transportera
16. Rotacioni mlin
17. Predgrijavanje u ciklonama
18. Rotaciona peć
19. Hladnjak klinkera
20. Guma trakastog transportera
21. Drobilica čekićara
22. Lijevak za punjenje
23. Pužni transporter
24. Silosi
25. Kuglični mlin
26. Kašika elevatora
27. Lijevak za punjenje
28. Silos
29. Transport završnog proizvoda
30. Kamion s mješalicom za beton
31. Kamion s pumpom za beton

Slika 14. Primjena Hardox čelika u pogonu za proizvodnju cementa [13]

5. ISPITIVANJA PROVEDENA NA ČELIKU HARDOX 500

Pregledom znanstvene i stručne literature može se dobiti uvid u mnoge radove čiji su predmeti ispitivanja usko povezani s tematikom ovog završnog rada. S obzirom na blisku povezanost, ovdje će se izdvojiti te detaljno opisati dva ispitivanja u kojima je napravljena usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje Hardox čelika s nekim drugim konstrukcijskim čelikom:

- Usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje čelika Hardox 500 i 20MnCr5, autora Tarasiuk W., Napiórkowski J., Ligier K., Krupicz B.,
- Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje čelika S235, S355, C45, X5CrNi18–10 i Hardox 500, upotrebom abraziva od granata, korunda i karborunda, autora Szala M., Szafran M., Macek W., Marchenko S., Hejwowski, T.

5.1. Usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje čelika Hardox 500 i 20MnCr5 [18]

Oba čelika, Hardox 500 i 20MnCr5 posjeduju visoku otpornost na abrazijsko trošenje i stoga se upotrebljavaju u proizvodnji strojeva koji se koriste u poljoprivredi (npr. plugovi), građevinarstvu (npr. dijelovi za bagere) i za slične svrhe.

Ispitivanja abrazivnog trošenja provedena su na uređaju T-11, metodom „pin-on-disc“, a dobiveni rezultati mogu biti korisni pri odabiru materijala za dijelove strojeva.

Ispitivanje je provedeno s ciljem utvrđivanja razlika u intenzitetu abrazijskog trošenja ovih dvaju čelika.

5.1.1. Metodologija ispitivanja

Za potrebe ovog ispitivanja izabrani su čelik Hardox 500 te niskolegirani čelik oznake 20MnCr5. Čelik 20MnCr5 prethodno je podvrgnut cementiranju. Cementiranje je uključivalo pougljičavanje pri temperaturi od 910 °C, kaljenje pri 820 °C te popuštanje pri 240 °C.

Na čelicima je provedeno ispitivanje tvrdoće te statičko vlačno ispitivanje, kako bi se utvrdila točna mehanička svojstva ispitivanih materijala. U skladu s normom EN 10002-1: 2001, uzorci čelika za statički vlačni pokus bile su epruvete, cilindričnog oblika, promjera 5 mm i duljine 25 mm.

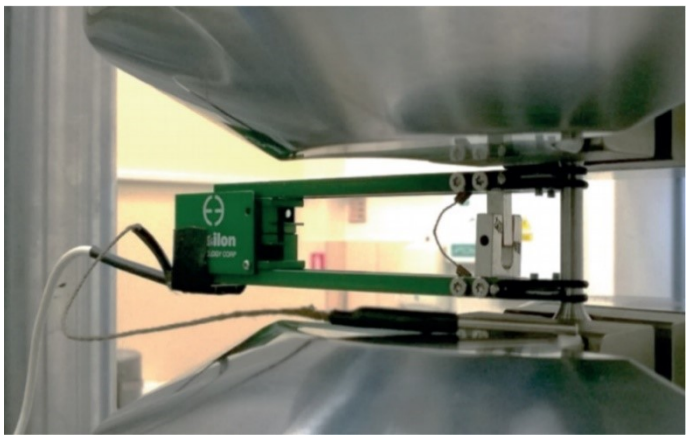
Na slici 15. prikazana je ispitna epruveta za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 15. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje [18]

Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno je pomoću MTS 322 ispitnog uređaja koji osigurava visoku preciznost mjerenja i bilježi širok raspon parametara. Vlačna ispitivanja provedena su na po tri uzorka svake vrste čelika, pri temperaturi od 239 K (-34 °C) i pri brzini deformacije od 0,02 mm/s.

Na slici 16. prikazan je uređaj na kojem se provodilo statičko vlačno ispitivanje, a dobivene vrijednosti mehaničkih svojstava čelika prikazane su u tablici 5.



Slika 16. Uređaj MTS 322 na kojem je provedeno statičko vlačno ispitivanje [18]

Tablica 5. Mehanička svojstva čelika Hardox 500 i 20MnCr5 [18]

Materijal	Mehanička svojstva			
	R_e [N/mm^2]	R_m [N/mm^2]	E [N/mm^2]	Tvrdoća HV20
Hardox 500	1336	1623	204000	511
Čelik 20MnCr5 (nakon cementiranja)	1009	1245	198000	582

Također, analizirana je mikrostruktura te kemijski sastav čelika. Vizualni pregled izvršen je pomoću svjetlosnog mikroskopa Neophot 52 spojen na digitalni fotoaparat Visitron Systems. Analize kemijskog sastava provedene su pomoću skenirajućeg mikroskopa JEOL JSM - 5800 LV.

Kemijski sastav Hardox 500 čelika prikazan je u tablici 6., a kemijski sastav čelika 20MnCr5 prikazan je u tablici 7.

Tablica 6. Kemijski sastav Hardox 500 [18]

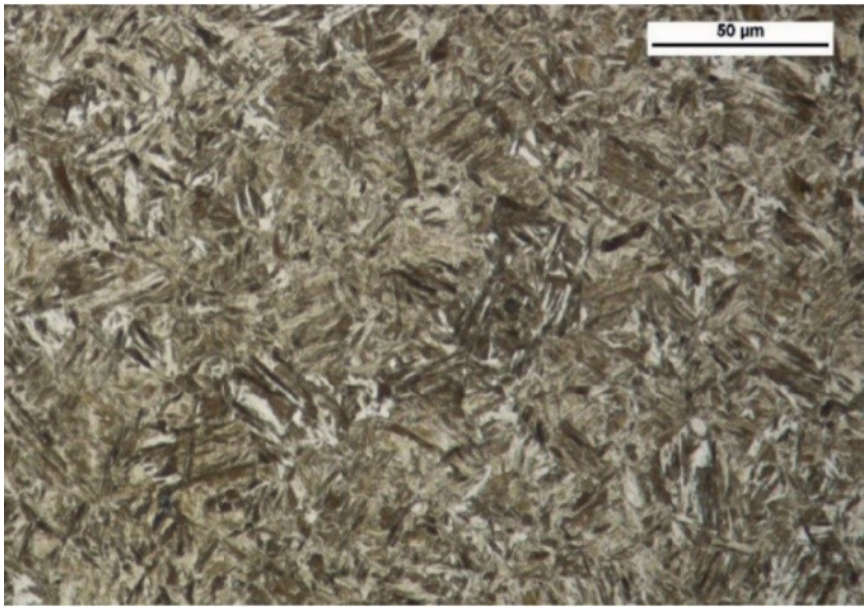
Čelik	Kemijski sastav						
	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%B
Hardox 500	0,29	0,70	1,60	1,00	0,50	0,60	0,004

Tablica 7. Kemijski sastav 20MnCr5 [18]

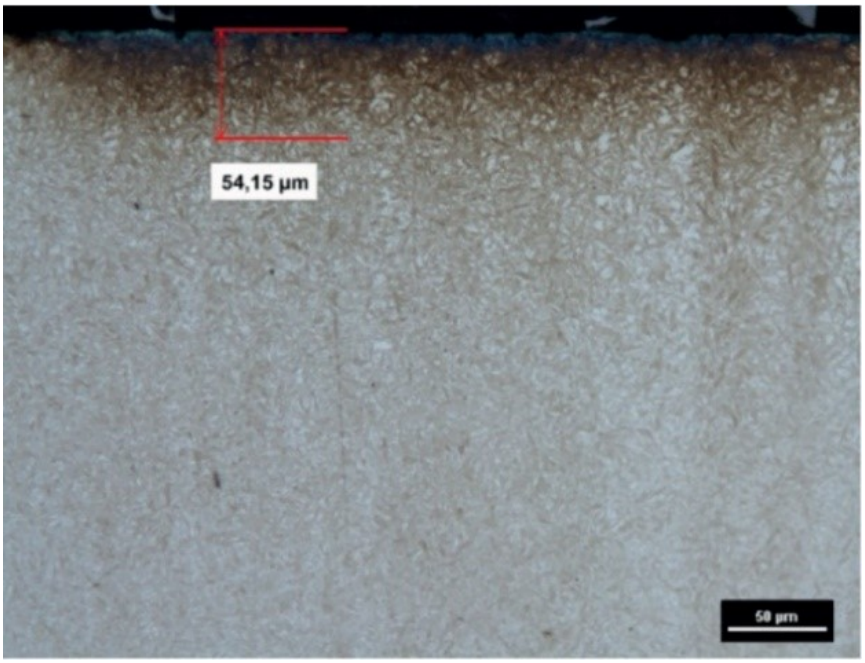
Čelik	Kemijski sastav				
	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni
20MnCr5	0,22	0,035	1,40	0,30	0,30

Mikrostruktura čelika Hardox 500 identificirana je kao popušteni martenzit, a može se vidjeti na slici 17.

Na slici 18. prikazana je mikrostruktura čelika 20MnCr5, koji je podvrgnut termo-kemijskoj obradi. Mikrostruktura čelika 20MnCr5 pokazuje da rubni sloj, u debljini od 55 µm, ima martenzitnu mikrostrukturu, a mikrostruktura dalje od ruba je drugačija i sastoji se ili od niskougljičnog martenzita ili je feritno-perlitna.



Slika 17. Mikrostruktura čelika Hardox 500 [18]



Slika 18. Mikrostruktura čelika 20MnCr5 [18]

Ispitivanja abrazijskog trošenja provedena su pomoću uređaja T-11 metodom „pin-on-disc“. Ovo ispitivanje omogućuje utvrđivanje sile trenja, koeficijenta trenja te intenziteta trošenja.

Na slici 19. prikazan je uređaj za ispitivanje, gdje brojevi označuju:

1 – iglica (pin),

2 – disk,

3 – senzor sile,

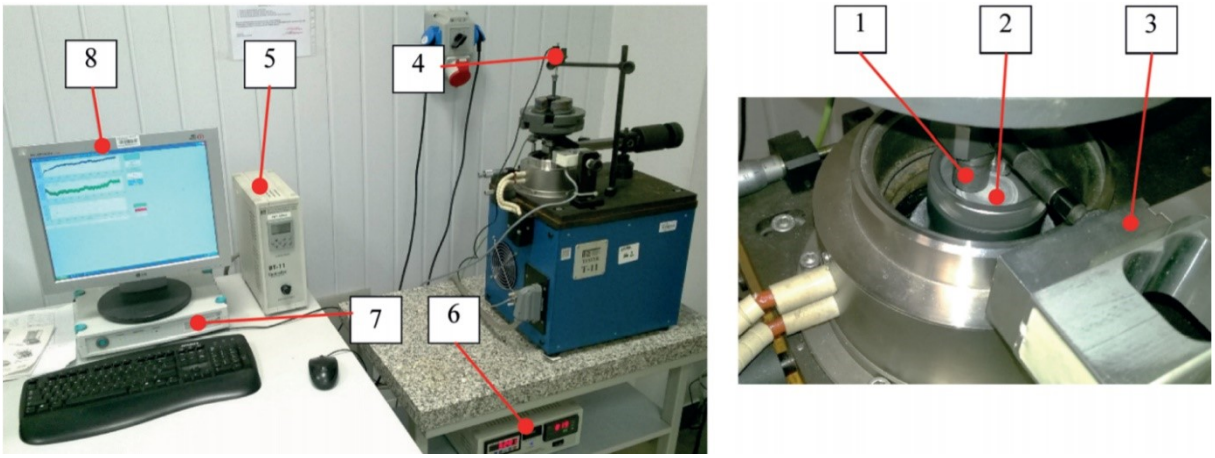
4 – senzor pomaka,

5 – regulator BT-11,

6 – regulator BT-03,

7 – digitalno pojačalo - Spider 8,

8 – računalna radna stanica.



Slika 19. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „*pin-on-disc*“ [18]

Uzorak za ispitivanje abrazijskog trošenja je cilindričnog oblika, promjera 6 mm. Protuuzorak je bio disk izrađen od smjese vapna i pijeska. Zbog neobičnog sastava protuuzorka, sila opterećenja odabrana je eksperimentalno, a kriterij odabira sastojao se od sposobnosti diska da izdrži opterećenje bez kočenja. Duljina trajanja ispitivanja također je određena eksperimentalno, kako bi se moglo dobiti stabilno trenje. Test je trajao 40 minuta. Brzina klizanja utvrđena je pri obodnoj brzini od 0,1 m/s. Uzorak je opterećen normalnom silom od 44 N, a brzina rotacije protuuzorka iznosila je 160 okr/min.

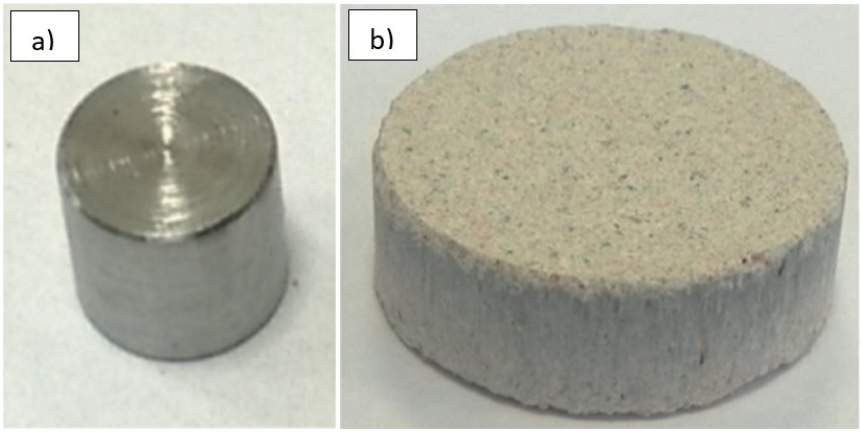
Tijekom eksperimenta praćena je vrijednost sile trenja F_{tr}, što je omogućilo određivanje koeficijenta trenja μ pomoću formule:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N} \quad (4)$$

Tlak p_t = 1,5 MPa izračunat je na temelju sljedećeg izraza:

$$p_t = \frac{4F_N}{\pi d^2} \quad (5)$$

Na slici 20. prikazan je uzorak a) i protuuzorak b) prije ispitivanja



Slika 20. Uzorak a) i protuuzorak b) prije ispitivanja [18]

Mjerenje mase uzorka prije i nakon ispitivanja omogućilo je određivanje intenziteta abrazijskog trošenja pomoću sljedećeg izraza:

$$I = \frac{m_1 - m_2}{s \times A} \quad (6)$$

gdje su:

m_1 – masa uzorka prije ispitivanja [mg],

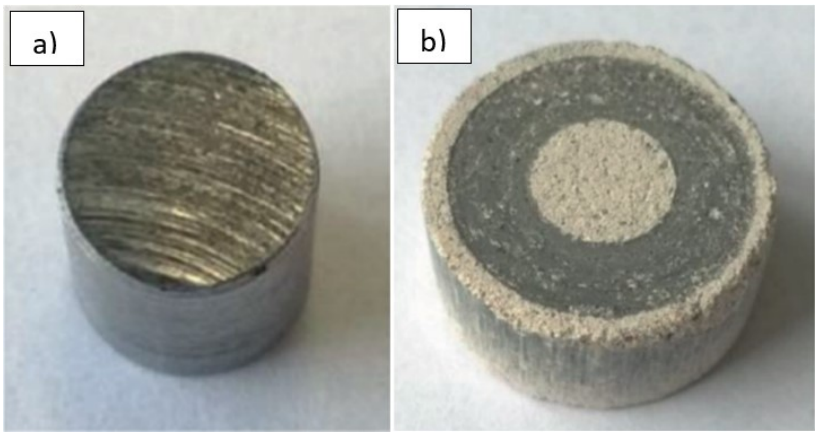
m_2 – masa uzorka nakon ispitivanja [mg],

s – udaljenost prijeđena uzorkom pod opterećenjem [m],

A – površina presjeka uzorka [m^2].

5.1.2. Rezultati ispitivanja

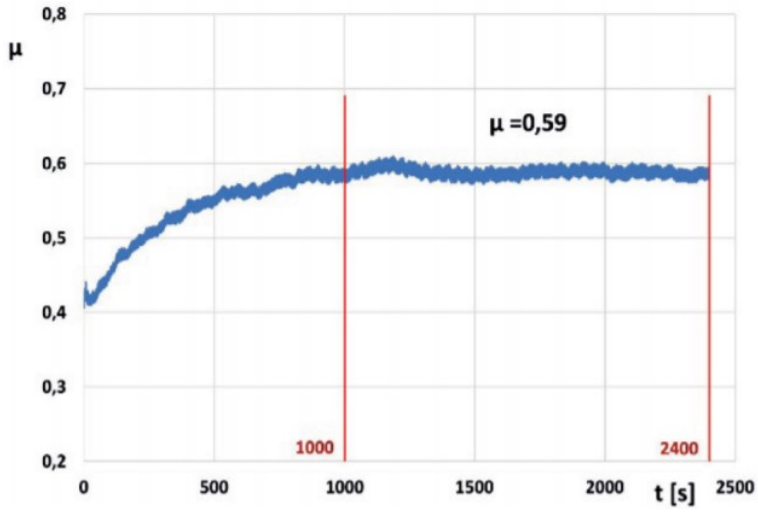
Slike uzorka a) i protuuzorka b) nakon ispitivanja prikazani su na slici 21.



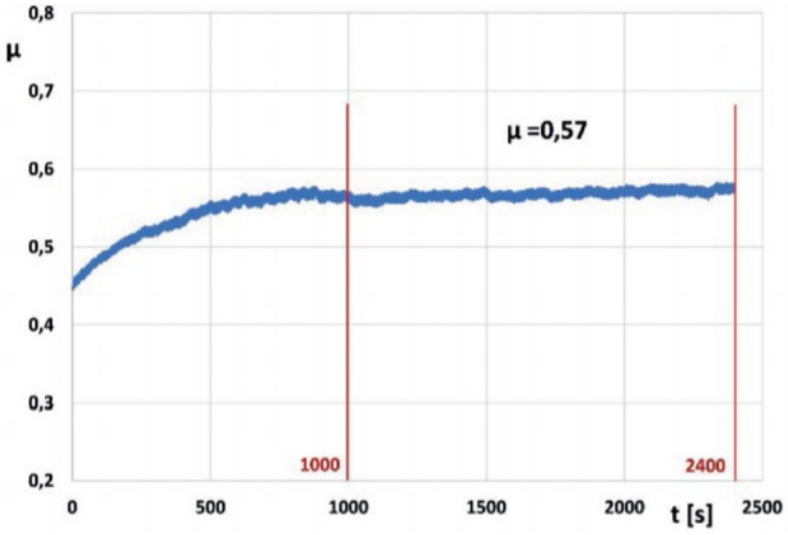
Slika 21. Uzorak a) i protuuzorak b) nakon ispitivanja [18]

Tijekom eksperimenta stvoren je sloj rastresitog abrazivnog materijala između uzorka i protuuzorka. Za svaki ispitivani materijal ispitivanje je tri puta ponovljeno. Rezultati su omogućili određivanje koeficijenata trenja za ispitivane materijale.

Na slikama 22. i 23. vidljive su promjene vrijednosti koeficijenta trenja tijekom vremena. U proračunima su korištene vrijednosti dobivene nakon stabilizacije postupka, odnosno nakon 1000 s.



Slika 22. Promjena koeficijenta trenja za čelik Hardox 500 [18]



Slika 23. Promjena koeficijenta trenja za čelik 20MnCr5 [18]

Rezultati ispitivanja korišteni su za određivanje prosječnog intenziteta abrazivnog trošenja I, prosječnog koeficijenta trenja μ, i prosječne sile trenja F_{tr}. Ovi parametri omogućuju procjenu otpornosti na abrazivno trošenje određenog materijala.

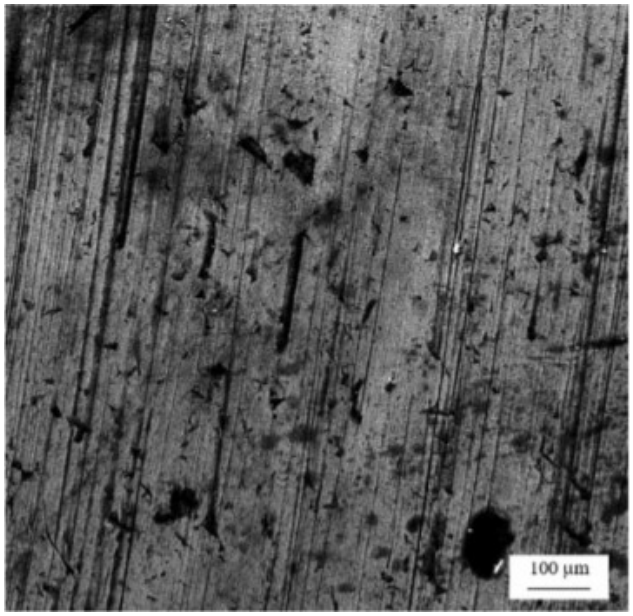
Popis dobivenih vrijednosti sile trenja, koeficijenta trenja i intenziteta trošenja uzoraka od čelika Hardox 500 i 20MnCr5 prikazan je u tablici 8.

Tablica 8. Dobivene vrijednosti nakon ispitivanja abrazijskog trošenja [18]

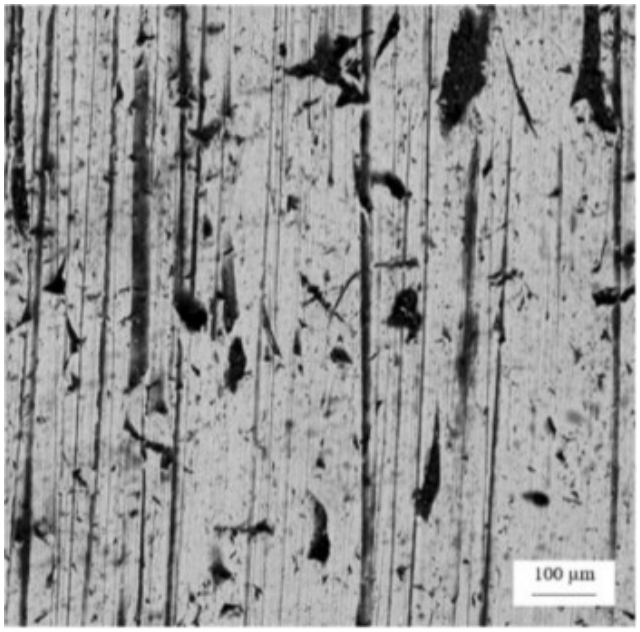
Čelik	**p_t=1,5 MPa**		
	Prosječni intenzitet trošenja [mg/m^3]	Prosječni koeficijent trenja	Prosječna sila trenja [N]
Hardox 500	1252,1	0,58	25,6
Čelik 20MnCr5 (nakon cementiranja)	1418,4	0,56	25,2

Tragovi abrazivnog trošenja na površini uzoraka vidljivi su na slikama 24. i 25.

Do abrazivnog trošenja došlo je uslijed mikrobrazdanja, ali na površinama uzoraka mogle su se uočiti i pukotine te rascjepi. Međutim, u slučaju oba čelika, glavni mehanizmi odgovorni za abrazijsko trošenje bili su mikrobrazdanje te mikrorezanje.



Slika 24. Površina čelika Hardox 500 nakon ispitivanja, x50 [18]



Slika 25. Površina čelika 20MnCr5 nakon ispitivanja, x50 [18]

5.1.3. Zaključak ispitivanja

Rezultati dobiveni pri opisanom ispitivanju pokazuju da čelik Hardox 500 ima veću otpornost na trenje i abrazijsko trošenje od čelika cementiranog čelika 20MnCr5.

Hardox 500 čelik karakterizira viša granica razvlačenja i viša krutost (razlika u tim vrijednostima iznosi približno 25 %).

Tvrdoća vanjskog sloja čelika 20MnCr5, podvrgnutog termokemijskoj obradi, veća je od tvrdoće Hardox 500 čelika. Razlika u vrijednosti intenziteta trošenja iznosi približno 12 %.

U oba slučaja glavni mehanizmi odgovorni za trošenje bili su mikrobrazdanje i mikrorezanje.

Dobivene vrijednosti koeficijenata trenja vrlo su slične za oba materijala. Uzrok tome mogao bi biti rastresiti sloj abrazivnog materijala koji se stvorio između uzorka i protuuzorka, a koji je imao slična svojstva tijekom svakog pokušaja.

U navedenom istraživanju nije uzeta u obzir razlika u gustoći između čelika Hardox 500 i čelika 20MnCr5, što je moglo dovesti do krivih zaključaka vezanih uz otpornost na abrazijsko trošenje. Mala je vjerojatnost da gustoća obaju čelika bude jednaka, zato što im se kemijski sastav poprilično razlikuje.

5.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje čelika S235, S355, C45, X5CrNi18–10 i Hardox 500, upotrebom abraziva od granata, korunda i karborunda [19]

Glavni cilj ovog ispitivanja jest usporedba abrazijskog trošenja dvaju opće konstrukcijskih čelika (S235JR, S355J2) i jednog čelika za cementiranje (C45), visokolegiranog nehrđajućeg konstrukcijskog čelika (X5CrNi18–10) i čelika Hardox 500, standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ s različitim abrazivima.

5.2.1. Metodologija ispitivanja

Ispitivanja abrazivnog trošenja izvedena su na pet vrsta čelika: C45 (1.0503; AISI 1045), X5CrNi18–10 (1.4301; AISI304); S235JR(1,0038); S355J2 (1.0577) i Hardox 500.

Prva četiri čelika su čelici koji se koriste u strojogradnji, a posljednji, Hardox 500 je konstrukcijski čelik visoke čvrstoće namijenjen za primjenu u uvjetima pojačanog mehaničkog trošenja.

Kemijski sastav i svojstva ispitivanih čelika prikazani su u tablici 9.

Mikrostruktura ispitivanih čelika promatrana je na metalografskim uzorcima pomoću optičkog mikroskopa Nickon MA200, a tvrdoća je mjerena na poliranim površinama uzoraka, Vickersovom metodom HV30, pri opterećenju od 294,3 N. Uzorci za ispitivanje abrazivnog trošenja izrezani su od ploča, s dimenzijama 5 × 29 ×29 mm^3.

Ispitivanja abrazivnog trošenja provedena su uz upotrebu tribotestera T07 metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“. Uređaj za ispitivanje opremljen je gumenim kotačićem (dimenzija ø44x15mm) koji se okreće brzinom od 62 okr/min. Kotačić je pritisnut na površinu ispitnog uzorka silom od 44 N.

Shematski prikaz a) i uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazivno trošenje b) prikazani su na slici 26.

Brojevima su označeni:

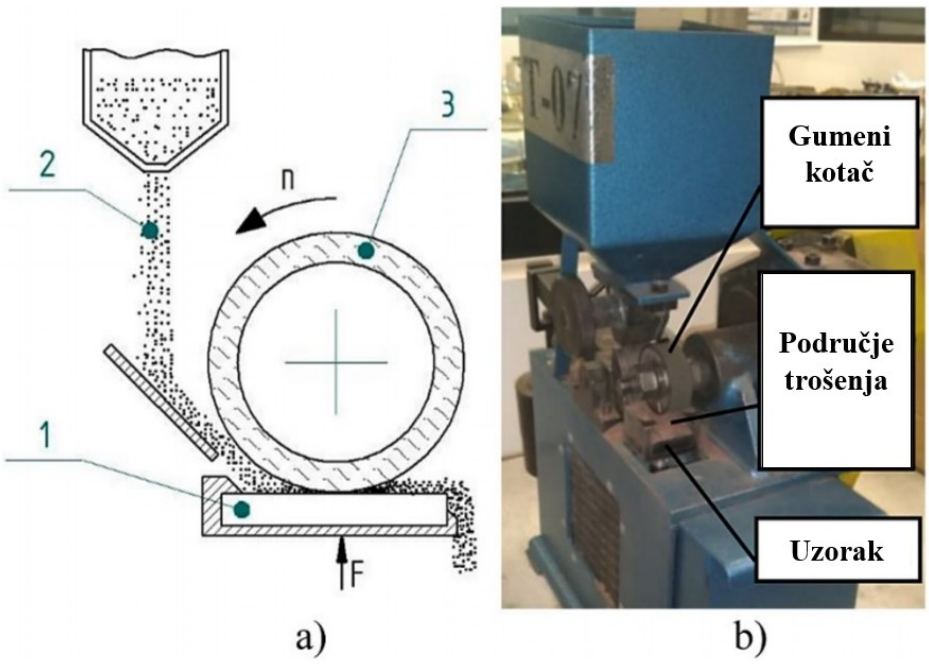
1 – ispitni uzorak,

2 – abraziv,

3 – gumeni kotačić.

Tablica 9. Svojstva ispitivanih čelika [19]

Svojstva čelika		**Oznaka čelika**				
		C45	X5CrNi18–10	S235JR	S355J2	Hardox 500
Kemijski sastav	%C	0,42 – 0,50	max 0,07	0,17	0,2	max 0,270
	%Si	0,17 – 0,37	max 1		max 0,55	max 0,7
	%Mn	0,50 – 0,80	max 2	max 1,40	max 1,6	max 1,6
	%P	max 0,040	max 0,045	max 0,035	max 0,025	max 0,025
	%S	max 0,040	max 0,015	max 0,035	max 0,025	max 0,01
	%Cr	max 0,30	17 – 19,50		max 0,3	max 1
	%Ni	max 0,30	8 – 10,50		max 0,3	max 0,25
	%Mo	max 0,10				max 0,25
R_m, [N/mm^2]		569	500 – 700	340	490	1550
R_e, [N/mm^2]		343	190	235	355	1400
A_5 [%]		14–17	45	21 – 26	20 – 22	10
ρ, kg/m3		7850	8000	7800	7850	7850



Slika 26. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje [19]

Pri ispitivanju su korištena tri različita abraziva: granat, korund, karborund. Morfologija abraziva proučavana je pomoću optičkog mikroskopa Keyence VHX 600.

Veličina zrna limitirana je prosijavanjem, određeni su volumni udjeli i prosječna veličina abraziva.

Veličina zrna abraziva klasificirana je prema FEPA standardima (*engl. Federation of European Producers of Abrasives - FEPA*).

Istrošena područja uzoraka promatrana su stereo-mikroskopom oznake Nickon SMZ1500.

Gubitak mase (Zw) izmjeren je s točnošću od 0,1 mg uz upotrebu vage WAS-222. Ispitivanje abrazivnog trošenja za svaku ispitivanu vrstu čelika ponovljeno je tri puta; tako su ukupno prikupljeni i analizirani podaci iz 15 testova. Zatim se gubitak mase *Zw* izračunao prema sljedećem izrazu:

$$Z_w = m_1 - m_2 \qquad (7)$$

gdje su:

m_1 – masa uzorka prije ispitivanja [g],

m_2 – masa uzorka nakon ispitivanja [g].

Uzorak čelika C45 upotrijebljen je kao referentni materijal. Stoga su prosječni gubici mase za referentne uzorke C45 i za ostale ispitivane uzorke imenovani *Zww*, odnosno *Zwb*.

$$Z_{ww} = \frac{\sum_{i=1}^{m} Zw_i}{m} \qquad (8)$$

$$Z_{wb} = \frac{\sum_{i=1}^{m} Z_{wi}}{m} \qquad (9)$$

gdje su:

m – ukupan broj uzoraka,

Zw_i – gubitak mase pojedinog uzorka [g].

Da bi se izračunala relativna otpornost na abrazivno trošenje K_b, volumni gubitak referentnog materijala Z_{vw} podijeljen je s volumnim gubitkom određenog materijala Z_{vb} – oba ispitana u istim ispitnim uvjetima.

$$K_b = \frac{Z_{vw} \times N_b}{Z_{vb} \times N_w} = \frac{Z_{ww} \times \rho_b \times N_b}{Z_{wb} \times \rho_w \times N_w} \qquad (10)$$

gdje su:

Zw_w – gubitak mase referentnog uzorka [g],

Zw_b – gubitak mase ispitivanog uzorka [g],

ρ_w – gustoća referentnog uzorka [g/cm^3],

ρ_b – gustoća ispitivanog uzorka [g/cm^3],

N_w – broj okretaja za referentni uzorak,

N_b – broj okretaja za ispitivani uzorak.

5.2.2. Rezultati ispitivanja

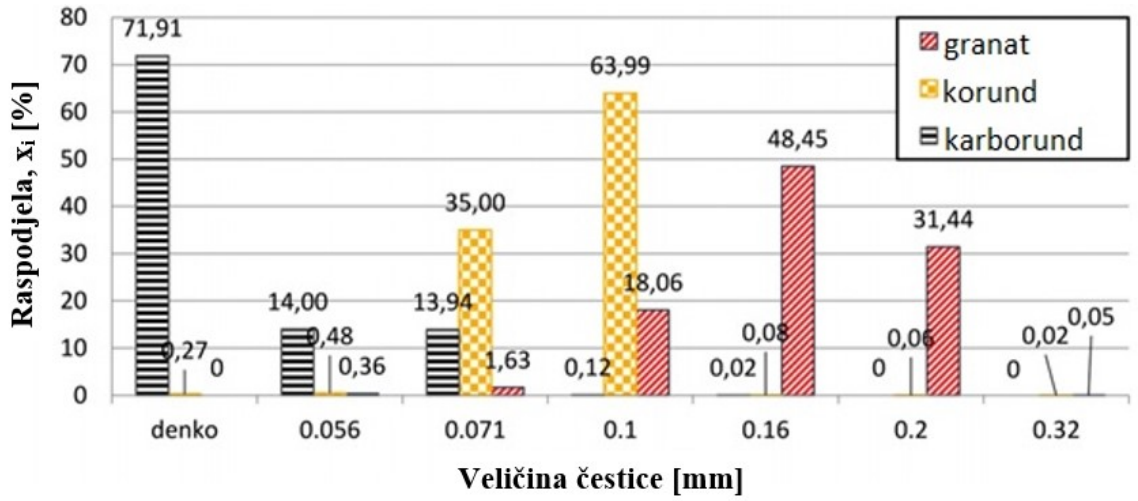
5.2.2.1. Usporedna analiza svojstava abraziva i uzoraka čelika

Svojstva materijala abrazivnih čestica (tvrdoća) te njihov oblik i veličina snažno utječu na rezultate trošenja, stoga su u ovome istraživanju korišteni abrazivi različitih svojstava. U tablici 10. prikazana su svojstva korištenih abraziva. Prosijavanje abraziva omogućilo je procjenu veličina abrazivnih čestica. Prosječna veličina abrazivnih čestica, za svaki abraziv, prikazana je na slici 27. Prosječna veličina abrazivnih čestica za granat je 0,18 mm, za korund iznosi 0,1 mm i za karborund 0,05 mm. Rezultati veličine abrazivnih čestica analizirani su u odnosu na FEPA-Standard 42-1: 2006. Grublja zrna abraziva identificirana su za granat F80 (makrogriti prema FEPA), zatim za korund s vrijednošću zrna F120 (makrogriti) i na kraju za karborund F230 - F240 (makrogriti i mikrogriti). Uspoređujući abrazivne čestice nakon prosijavanja te morfologiju abraziva ustanovljeno je da granatni abrazivni materijal ima prosječnu veličinu zrna, korund je sastavljen od finih i vrlo sitnih zrna, a karborund je sastavljen od vrlo sitnih zrna i mikrozrna. Granat ima najgrublje, ali najmekše čestice, što je suprotno od karborunda.

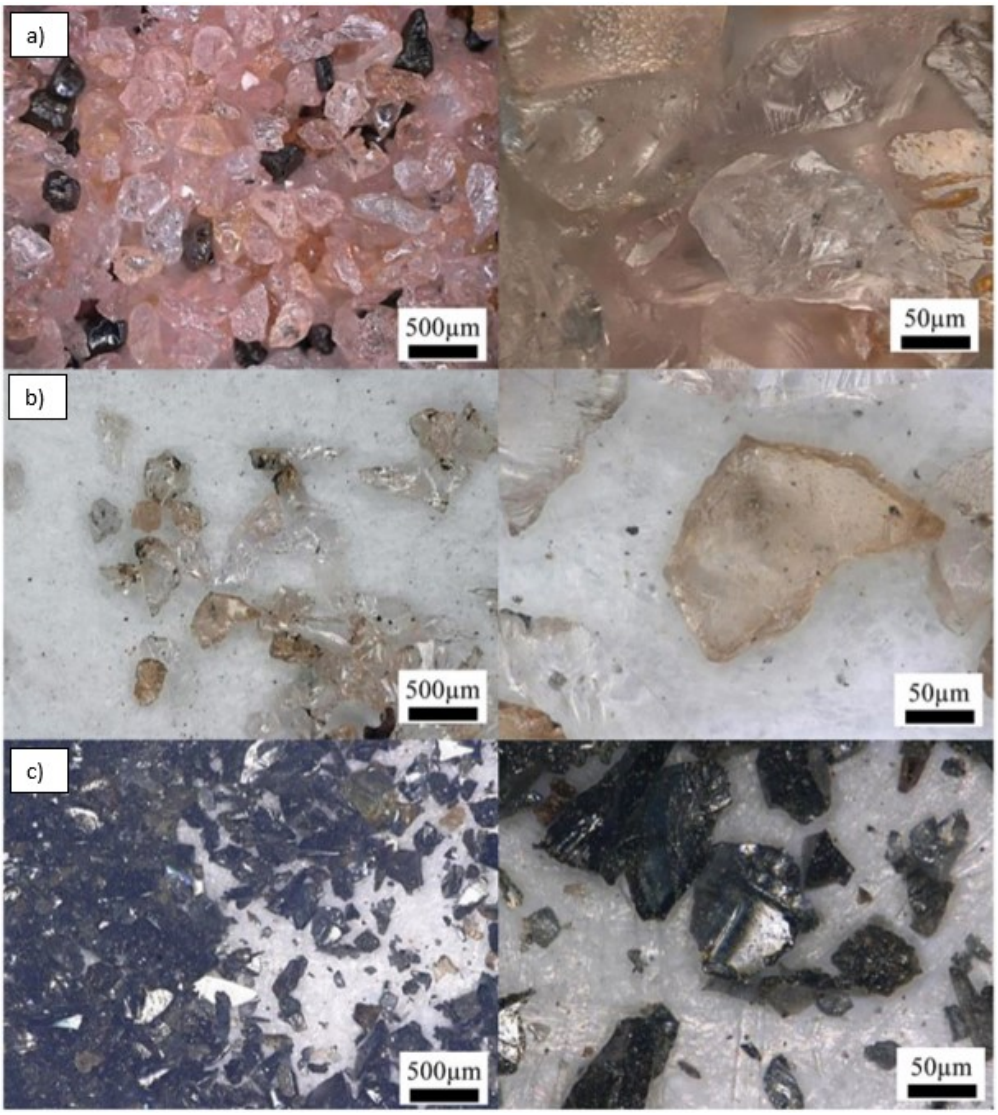
Na slici 28. prikazane su abrazivne čestice granata, korunda te karborunda. Slika pokazuje da svi abrazivi imaju nepravilan oblik koji karakteriziraju oštri rubovi, ali pokazuje i da zrna granata izgledaju sferičnog i kompaktnijeg oblika od zrna karborunda i korunda.

Tablica 10. Svojstva abraziva [19]

Tip abraziva	Granat	Korund	Karborund
Kemijski sastav	$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	Al_2O_3	SiC
Gustoća [g/cm^3]	3,5 – 4,25	3,9 – 4,0	3,15 – 3,22
Oblik zrna	Nepravilan oblik s oštrim rubovima	Nepravilan oblik s oštrim rubovima	Nepravilan oblik s oštrim rubovima
Tvrdoća, HV	600–1355	1800	2600
Tvrdoća, Knopp K_{100}	1360	2050	2480
Mohsova tvrdoća	7 – 8,0	9,0	9,5
Srednja vel. zrna [mm]	0,18	0,10	0,05



Slika 27. Raspodjela veličina abrazivnih čestica [19]



Slika 28. Morfologija abrazivnih materijala: a) granat, b) korund, c) karborund [19]

5.2.2.2. Mikrostruktura i tvrdoća ispitivanih materijala

Tvrdoća ispitivanih materijala provedena je Vickersovom metodom, a rezultati su prikazani u tablici 11.

Niskougljični konstrukcijski čelici S235JR i S355J2 imaju feritno-perlitnu strukturu. Čelik S355J2 ima veći udio ugljika od čelika S253JR, a samim time i veći udio perlita te veću tvrdoću.

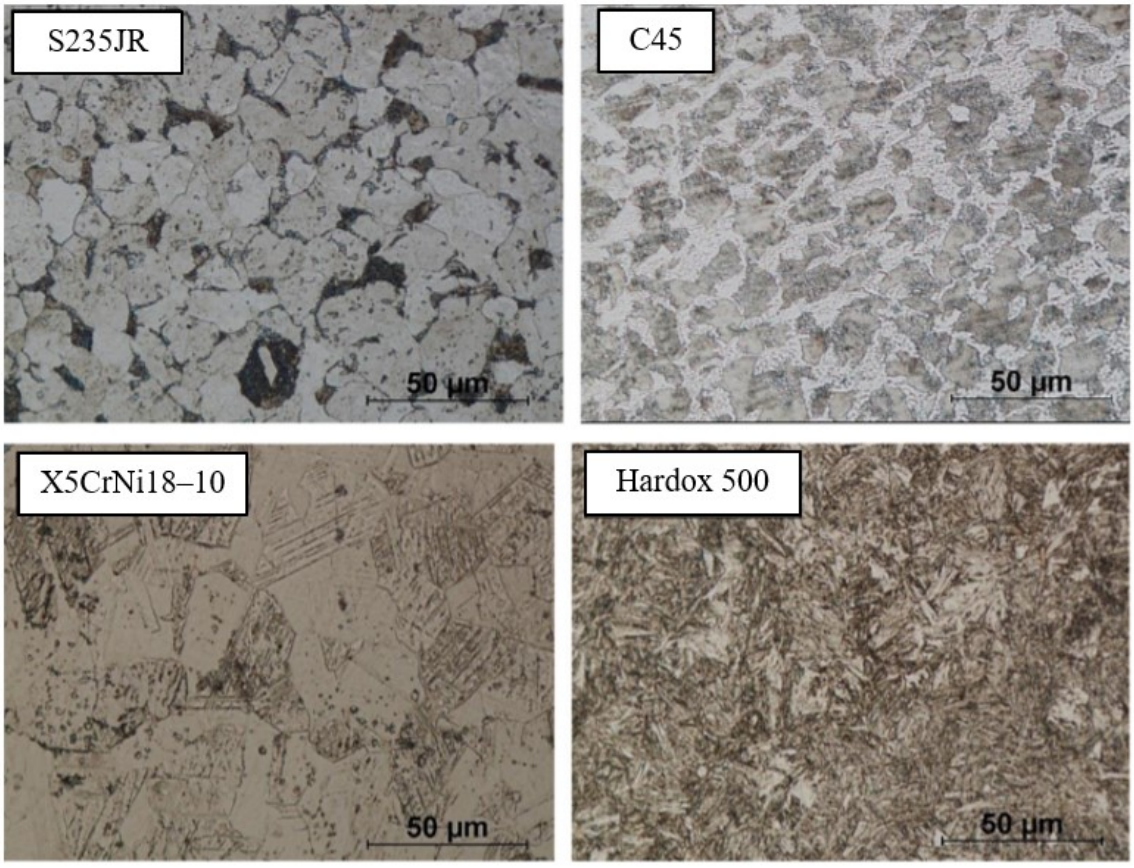
Ugljični čelik, C45, ima normaliziranu feritno-perlitnu strukturu i veći udio relativno tvrdog perlita koji utječe na prosječnu tvrdoću od 229 HV30.

X5CrNi18–10 je visokolegirani nehrđajući čelik, ugnječene austenitne strukture s tipičnim austenitnim zrnima u obliku kristala blizanaca.

Hardox 500 ima popuštenu martenzitnu strukturu, bez zaostalog austenita. Martenzitna struktura ovog čelika utječe na njegovu izvanrednu tvrdoću, koja u prosjeku iznosi 521 HV30. Na slici 29. prikazana je mikrostruktura ispitivanih materijala.

Tablica 11. Tvrdoća ispitivanih materijala [19]

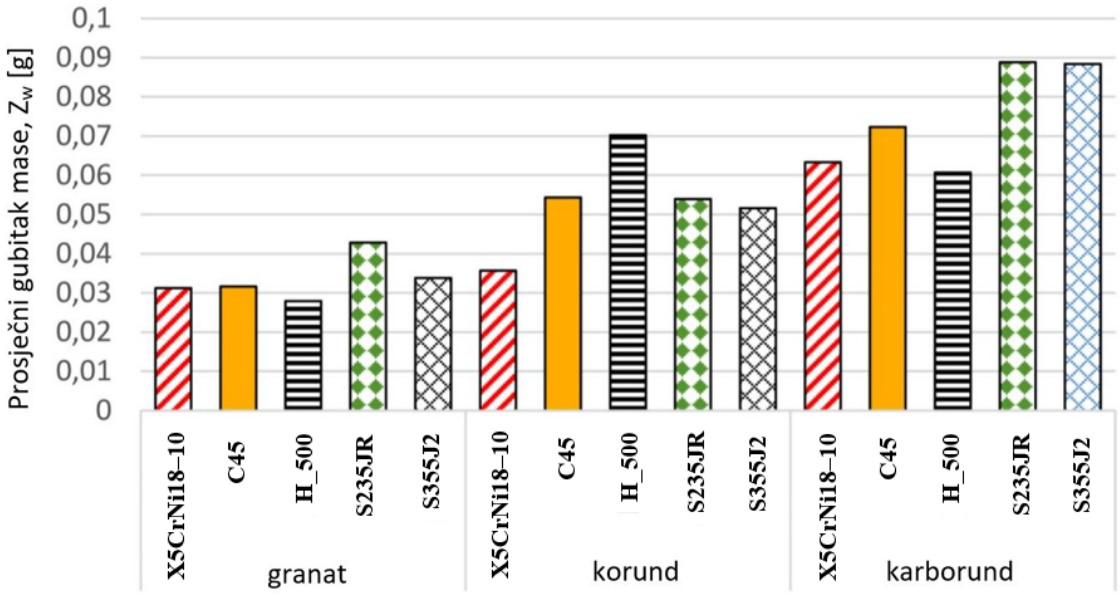
Oznaka čelika	Tvrdoća, HV30
S235JR	128±2
S355J2	155±5
X5CrNi18–10	211±7
C45	229±3
Hardox 500	521±15



Slika 29. Mikrostruktura ispitivanih materijala [19]

5.2.2.3. Rezultati ispitivanja abrazivnog trošenja

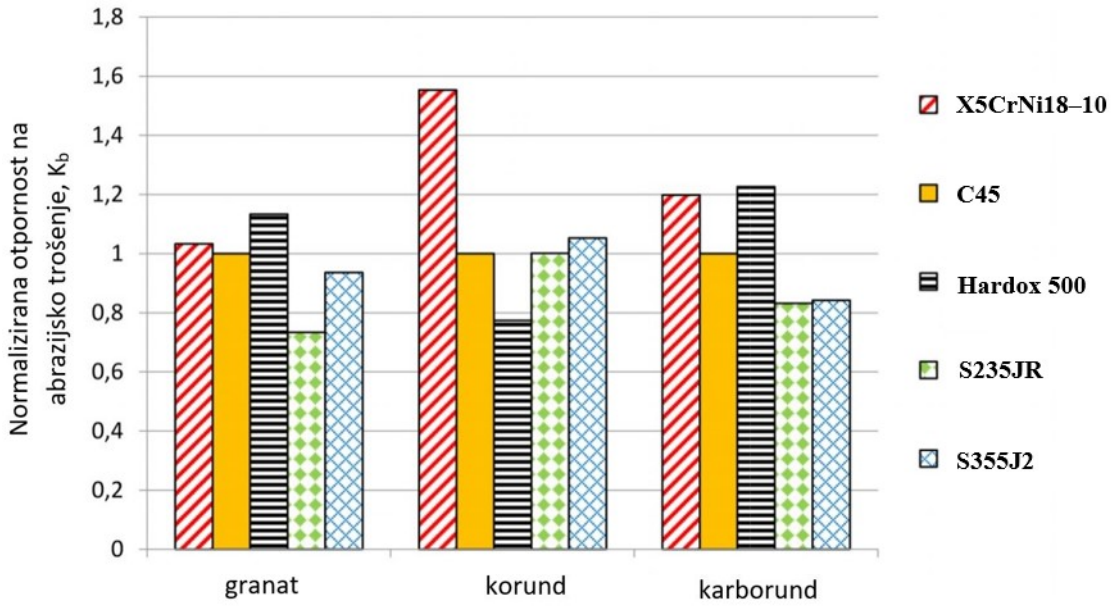
Tijekom eksploatacije, elementi strojeva mogu biti izloženi abrazijskom trošenju u dodiru s abrazivnim materijalima, kao što su zemlja, šljunak, pijesak i slično. U takvim slučajevima, abrazivne čestice mogu se relativno slobodno kretati. Ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ dobro simulira stvarne uvjete abrazijskog trošenja. Ispitivanje abrazijskog trošenja pokazalo je da isti čelik pokazuje različiti gubitak mase ovisno o abrazivu. Na slici 30. prikazan je prosječni gubitak mase pojedinog ispitivanog čelika u ovisnosti o vrsti abraziva.



Slika 30. Ovisnost prosječnog gubitka mase o vrsti abraziva [19]

Također, ispitivanje je pokazalo da obično abraziv od granata rezultira najnižom, a karborund najvećom stopom trošenja. Tijekom analize normalizirane otpornosti na abrazijsko trošenje (K_b) u odnosu na tri različita abraziva (granat, korund i karborund), može se zaključiti da niti jedan od ispitivanih materijala ne posjeduje univerzalnu izvanrednu otpornost na abrazijsko trošenje.

Na slici 31. prikazana je ovisnost normalizirane otpornosti na abrazijsko trošenje u odnosu na različitu vrstu abraziva.



Slika 31. Ovisnost normalizirane otpornosti na abrazijsko trošenje o različitoj vrsti abraziva [19]

Dakle, izbor materijala za primjenu u određenim radnim uvjetima trebao bi uključivati ispitivanja abrazijskog trošenja s abrazivnim materijalom specifičnim za primjenu u radnim uvjetima koji su slični stvarnim. Na primjer, čelik Hardox 500 ima izvanrednu otpornost na abraziju s granatom i karborundom, ali slabiju otpornost na korund.

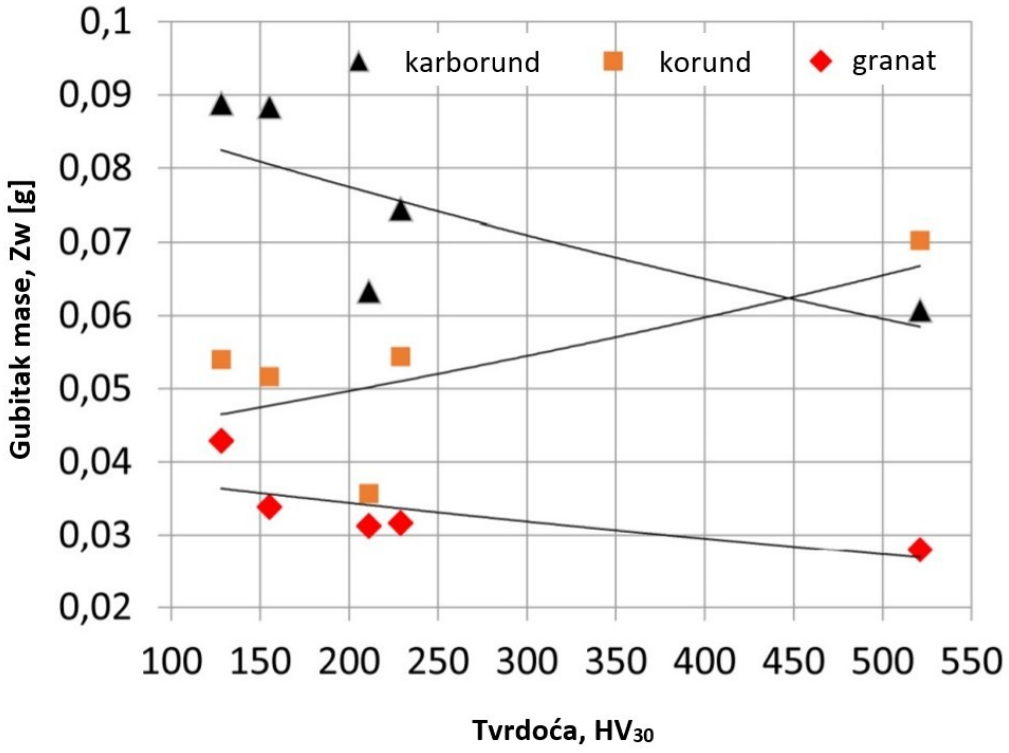
Proučavanjem mikrostrukture ispitivanih čelika i rezultata abrazijskog trošenja dokazuje se da je otpornost na abrazijsko trošenje povezana s mikrostrukturom čelika. Ispitivani čelici imaju različitu tvrdoću i mikrostrukturu (feritno-perlitnu, austenitnu i martenzitnu). U tablici 12. prikazana je otpornost na abrazijsko trošenje u odnosu na mikrostrukturu ispitivanog čelika. Ispitivanja provedena s granatom i karborundom pokazuju sličan trend, tj. čelici s feritno-perlitnom mikrostrukturom manje su otporni na abraziju od čelika s martenzitnom mikrostrukturom. S druge strane, čelik X5CrNi18–10, s austenitnom mikrostrukturom pruža vrlo dobru otpornost na abraziju tijekom ispitivanja s korundom. U odnosu na martenzitne čelike, granat je mekan, stoga ne abradira čelike jednako učinkovito kao tvrdi korund.

Kao što je već spomenuto, abrazijsko trošenje materijala uvelike ovisi o tvrdoći čelika.

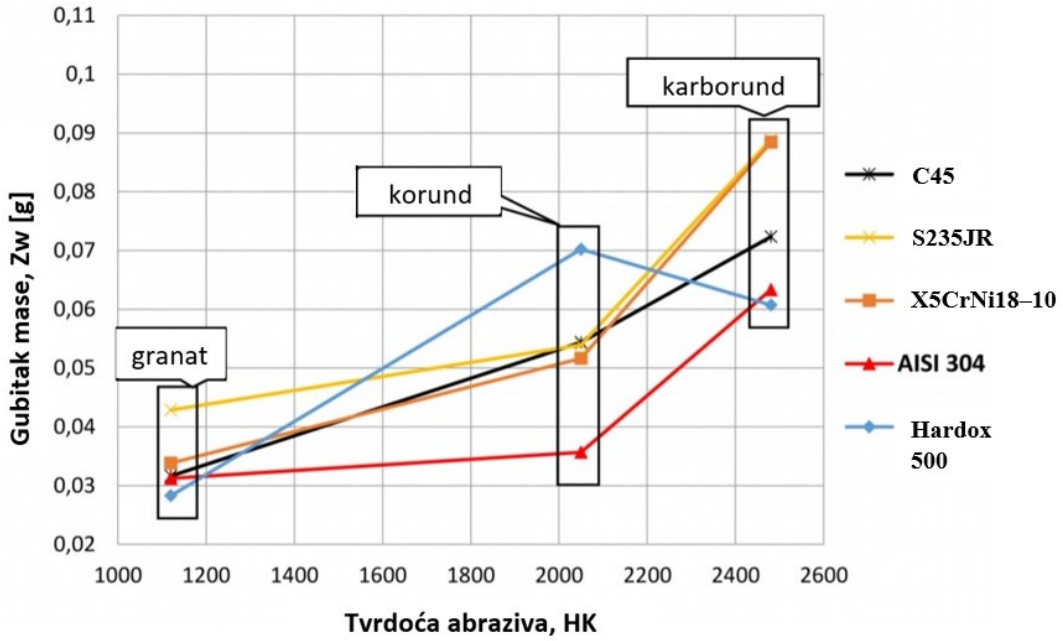
Na slici 32. prikazana je ovisnost gubitka mase čelika uslijed abrazijskog trošenja o tvrdoći ispitivanog čelika, a slika 33. pokazuje utjecaj tvrdoće abraziva na gubitak mase čelika.

Tablica 12. Otpornost na abrazijsko trošenje ovisno o mikrostrukturi [19]

Abrazivni materijal	**Otpornost na abrazijsko trošenje**	
	Čelik	Mikrostruktura
Granat	S235JR < S355J2 < C45 < X5CrNi18–10 < Hardox 500	ferit+perlit < austenit < martenzit
Korund	Hardox 500 < S235JR = C45 < S355J2 < X5CrNi18–10	martenzit < ferit+perlit < austenit
Karborund	S235JR = S355J2 < C45 < X5CrNi18–10 < Hardox 500	ferit+perlit < austenit < martenzit



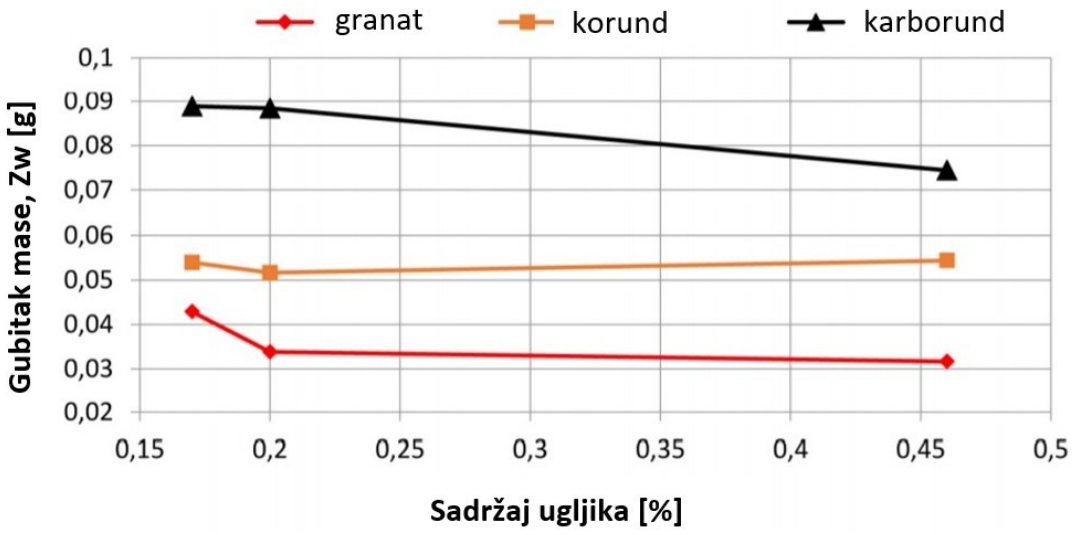
Slika 32. Gubitak mase čelika u ovisnosti o tvrdoći čelika [19]



Slika 33. Utjecaj tvrdoće abraziva na rezultate abrazijskog trošenja [19]

Otpornost na trošenje ugljičnih čelika S235JR, S355J2 i C45 povećava se sa sadržajem ugljika i tvrdoćom.

Utjecaj udjela ugljika u čeliku na gubitak mase čelika uslijed abrazijskog trošenja prikazan je na slici 34.

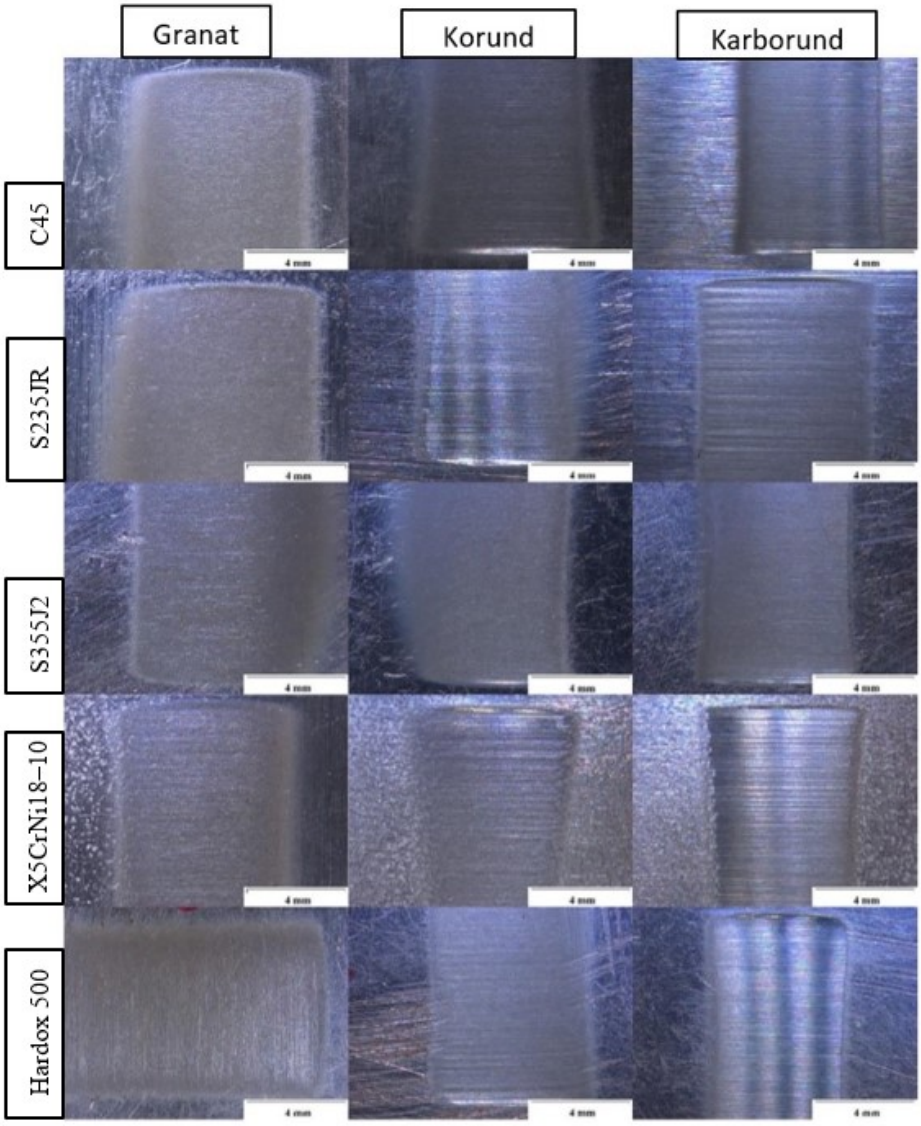


Slika 34. Utjecaj sadržaja ugljika na otpornost na abrazijsko trošenje ugljičnih čelika S235JR, S355J2 i C45 [19]

Analiza tragova abrazijskog trošenja provedena je stereo-mikroskopom. Različiti abrazivni materijali imaju različita svojstva, kao što su struktura, tvrdoća i oblik, stoga različito djeluju na površinu različitih vrsta čelika.

Abrazijsko trošenje koje nastaje uslijed abradiranja površine karborundom i korundom rezultira mikrorezanjem i mikrobrazdanjem površine (dominacija mikrorezanja karakteriziranog dugim udubljenjima). Abradiranje površine granatom, s relativno grubim, ali mekim česticama, rezultira mikrorezanjem, ali s puno manjim udubljenjima.

Na slici 35. prikazani su tragovi trošenja ispitnih uzoraka nakon ispitivanja abrazijskog trošenja.



Slika 35. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima [19]

5.2.3. Zaključak ispitivanja

Na temelju rezultata ispitivanja može se zaključiti da abrazivno trošenje s granatom uzrokuje manji gubitak mase ispitnog uzorka, nego kod trošenja s korundom ili karborundom, što se može objasniti njegovom manjom tvrdoćom u odnosu na druga dva. Korištenje različitih abraziva daje različite rezultate otpornosti na abrazijsko trošenje svake ispitivane vrste čelika.
Austenitni nehrđajući čelik, X5CrNi18–10, pruža izvanrednu otpornost na abrazivno trošenje tijekom ispitivanja s korundom.
S druge strane, Hardox 500 pokazuje najveću otpornost na abrazijsko trošenje tijekom ispitivanja s granatom.
Ugljični čelik C45 bio je manje otporan na abraziju od čelika X5CrNi18–10 na sva tri abraziva.
Najmanju otpornost na abrazijsko trošenje pokazuju feritno-perlitni opći konstrukcijski čelici S235JR i S355J2. Najmanju otpornost na abrazijsko trošenje s česticama korunda ima čelik Hardox 500 s popuštenom martenzitnom mikrostrukturom.
Mikromehanizam abrazijskog trošenja koji je dominirao u ovim ispitivanjima bio je mikrorezanje.
Ovo ispitivanje zaključuje da čelici X5CrNi18–10, Hardox 500 i C45 posjeduju visoku otpornost na abrazijsko trošenje, dok čelici S235JR i S355J2 imaju nisku otpornost na abrazijsko trošenje. Hardox 500 čelik je najatraktivniji zbog upotrebe u dijelovima strojeva koji su izloženi abrazivnom trošenju, jer je trenutno tržišna cijena ovog čelika upola manja od cijene X5CrNi18–10. Međutim, treba imati na umu da Hardox čelik ima malu otpornost na abrazivnost korunda.

6. ZAKLJUČAK

Pregledom znanstvene i stručne literature koje se odnose na konstrukcijske čelike otpornosti na abrazijsko trošenje, može se izdvojiti nekoliko zaključaka:

a) Trošenje materijala je neizbježan proces gubitka materijala uslijed međusobnog dodira materijala s drugim tijelom, fluidom ili česticama. Četiri osnovna oblika, odnosno mehanizma trošenja su: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Abrazijski mehanizam trošenja je najčešći.

b) Abrazijski mehanizam trošenja predstavlja trošenje materijala uslijed dodira s drugim tvrđim materijalom pri relativnom gibanju, a dijeli se na četiri osnovna mikromehanizma: mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprsnuća te mikroumor.

c) Otpornost na abrazijsko trošenje ovisi o tvrdoći materijala te o njegovoj mikrostrukturi. Što je materijal tvrđi, to će abrazivnim česticama biti teže prodrijeti u materijal i istisnuti materijal u obliku čestica trošenja. Dakle, materijal će biti otporniji na abrazijsko trošenje ukoliko mu je mikrostruktura sastavljena od tvrdih faza.

d) Najpoznatiji konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje su Hardox čelici, švedskog proizvođača SSAB Oxelösund.

e) Hardox čelici sadrže nizak maseni udio ugljika te precizno određene masene udjele i vrstu legirnih elemenata. Legiraju se niklom (Ni), manganom (Mn), kromom (Cr), molibdenom (Mo) te borom (B), a ograničen je i maseni udio primjesa kao što su sumpor (S) i fosfor (P).

f) Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje su niskolegirani čelici s popuštenom martenzitnom strukturom. Martenzitna struktura osigurava visoku tvrdoću na površini, a samim time i otpornost na abrazijsko trošenje, dok se popuštanjem povisuje žilavost martenzita postignutog kaljenjem što osigurava dobru dinamičku izdržljivost. Osim martenzita, u mikrostrukturi ovih čelika mogu biti izlučeni fini koherentni karbidi koji dodatno povećavaju otpornost na trošenje. Također treba napomenuti da mikrostruktura nekih suvremenih čelika otpornih na trošenje može biti martenzitno-bainitno-feritna (čelik HTK 700).

g) Hardox čelici imaju iznimno dobra tribološka, mehanička te tehnološka svojstva. Nominalna tvrdoća ovih čelika iznosi oko 450 HBW, što uz visoku žilavost i granicu razvlačenja omogućuje primjenu i u dinamički opterećenim radnim uvjetima.

h) Prilikom proučavanja ispitivanja provedenih na Hardox čeliku, u usporedbi s drugim konstrukcijskim čelicima te različitom vrstom abraziva, potvrđeno je da Hardox čelik ima vrlo visoku otpornost na abrazijsko trošenje. Također, ima vrlo visoku otpornost na trošenje na većinu vrsta abraziva, jedino na abraziju korundom rezultira manjom otpornošću.

LITERATURA

[1] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1998.

[2] https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf (datum preuzimanja: 20.8.2020.)

[3] Grilec, K., Jakovljević, S.: Tribologija, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[4] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.

[5] K.-H. Zum Gahr, „Microstructure and Wear of Materials“, Elsevier, AmsterdamOxford-New York 1987.

[6] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[7] Novosel M., Krumes D.: Posebni čelici, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski brod, 1998.

[8] Novosel M., Cajner F., Krumes D.: Željezni materijali – II. dio; Konstrukcijski čelici, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski brod, 1994.

[9] Dudziński W., Konat Ł., Pękalski G.: Structural and strength characteristics of wear-resistant martensitic steels, Archives of Foundry Engineering, Volume 8 Issue 2/2008., 21-26

[10] https://virgamet.com/high-manganese-hard-wearing-abrasion-resistant-hadfield-steel (datum preuzimanja: 21.8.2020.)

[11] Astudillo P.C.A., Soriano G., Osorio G.M.B., Sánchez H.S., Ramos J., Durán J. F., Pérez Alcázar G.A.P.: Comparative study of the mechanical and tribological properties of a Hadfield and a Fermanal steel, Hyperfine Interact 238:56, 2017.

[12] Ratia, V.: Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions, Tampere University of Technology, Tampere, 2015.

[13] https://www.ssab.com/products/brands/hardox/hardox-download (datum preuzimanja: 24.8.2020.)

[14] https://www.raexsteel.com/raex-downloads (datum preuzimanja: 14.9.2020.)

[15] https://www.htk.com.pl/hut_trans.php?main/karty_katalogowe (datum preuzimanja: 14.9.2020.)

[16] https://industeel.arcelormittal.com/products/wear-resistant-steels/water-quenched-grades-with-400-450-500-hb/relia/ (datum preuzimanja: 14.9.2020.)

[17] https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-500 (datum preuzimanja: 21.8.2020.)

[18] Szala M., Szafran M., Macek W., Marchenko S., Hejwowski T.: Abrasion resistance S235, C45, AISI 304 and Hardox 500 steels with usage of garnet, corundum and carborundum abrasives, Advances in Science and Technology Research Journal, Volume 13, Issue 4, 2019., 151–161

[19] Tarasiuk W., Napiórkowski J., Ligier K., Krupicz B.: Comparison of the wear resistance of Hardox 500 steel and 20MnCr5, Tribologia 3/2017., 165–170