

Usporedba mikrostrukture i svojstava dvaju konstrukcijskih čelika otpornih na trošenje

Lukšić, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:350847>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Helena Lukšić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Student:

Helena Lukšić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Veri Rede na savjetima, stručnoj pomoći, strpljenju i izdvojenom vremenu tijekom izrade diplomskoga rada.

Zahvaljujem tvrtki Hidraulika Kurelja d.o.o. na donaciji uzoraka za izradu eksperimentalnoga dijela diplomskoga rada, tvrtki Pireko d.o.o. na rezanju ispitnih uzoraka te tvrtki POL d.o.o. na pomoći prilikom odabira abrazivnih papira.

Helena Lukšić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **HELENA LUKŠIĆ**

Mat. br.: 0035212926

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba mikrostrukture i svojstava dvaju konstrukcijskih čelika otpornih na trošenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of microstructure and properties of two wear resistance structural steels**

Opis zadatka:

Otpornost materijala na trošenje je svojstvo koje se najčešće povezuje uz alatne materijale. Postoje, međutim, područja primjene gdje se i od konstrukcijskih dijelova primarno traži što viša otpornost na trošenje osobito na abrazijski mehanizam trošenja. Takvi dijelovi su npr. dijelovi građevinskih strojeva koji su u dinamičkom kontaktu s tvrdim česticama koje mogu abradirati njihovu površinu i dovesti do prekomjernog mehaničkog istrošenja. Abrazijska otpornost usko je povezana s tvrdoćom materijala, ali ova dva svojstva nisu potpuno istoznačna.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je usporediti otpornost na abrazijsko trošenje dvaju konstrukcijskih čelika od kojih se izrađuju dijelovi izloženi intenzivnoj abraziji. U tu svrhu potrebno je provesti standardno ispitivanje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ te ispitivanje na Taber abraderu. Također je potrebno odrediti mikrostrukturu i izmjeriti mikrotvrdoću te makrotvrdoću istih čelika, analizirati dobivene rezultate i na temelju toga donijeti odgovarajuće zaključke

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao: *Rede*
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:
Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA.....	VII
POPIS KRATICA.....	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY.....	X
1. UVOD.....	1
2. TROŠENJE.....	2
2.1. Abrazijsko trošenje.....	2
2.1.1. Otpornost na abrazijski mehanizam trošenja.....	9
2.1.2. Kritična veličina abrazivnog zrna.....	9
3. STANDARDNE METODE ZA ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE.....	12
3.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ 12	
3.1.1. Uzorci i oprema za metodu „suhi pijesak – gumeni kotač“.....	12
3.1.2. Postupak provođenja ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“.....	14
3.2. Ispitivanje Taber abraderom.....	15
4. SVOJSTVA KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA POBOLJŠANE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE.....	16
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	23
5.1. Cilj rada.....	23
5.2. Materijal za ispitivanje.....	23
5.3. Provedena ispitivanja.....	25
5.3.1. Analiza kemijskog sastava.....	25
5.3.2. Analiza mikrostrukture.....	26

5.3.3.	Mjerenje tvrdoće	28
5.3.4.	Određivanje gustoće.....	29
5.3.5.	Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	31
5.3.5.1.	Standardna metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ - ASTM G65-94	31
5.3.5.2.	Taber abrader	38
5.4.	Rezultati ispitivanja	42
5.4.1.	Rezultati analize kemijskog sastava.....	42
5.4.2.	Rezultati analize mikrostrukture.....	43
5.4.2.1.	Analiza mikrostrukture u poliranom stanju	43
5.4.2.2.	Analiza mikrostrukture u nagriženom stanju.....	44
5.4.3.	Rezultati mjerenje tvrdoće.....	48
5.4.3.1.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	48
5.4.3.2.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV1	49
5.4.3.3.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV2	50
5.4.4.	Rezultati određivanja gustoće.....	50
5.4.5.	Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje	51
5.4.5.1.	Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	51
5.4.5.2.	Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader.....	52
5.5.	Analiza rezultata	55
5.5.1.	Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava	55
5.5.2.	Osvrt na rezultate analize mikrostrukture	55
5.5.3.	Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće	55
5.5.4.	Osvrt na rezultate mjerenja otpornosti na trošenje	57
5.5.4.1.	Osvrt na rezultate mjerenja otpornosti na trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	57
5.5.4.2.	Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na trošenje na uređaju Taber abrader.....	58
6.	ZAKLJUČAK.....	60
	LITERATURA.....	61

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz jediničnog događaja abrazivnog trošenja [1]	3
Slika 2.	Shematski prikaz abrazije u međusobnom dodiru dvaju i triju tijela [3]	4
Slika 3.	Shematski prikaz mikromehanizama abrazijskog trošenja [2]	5
Slika 4.	Shematski prikaz „čiste“ abrazije [1]	6
Slika 5.	Shematski prikaz selektivne abrazije [1]	7
Slika 6.	Shematski prikaz „nulte“ abrazije [1]	8
Slika 7.	Shematski prikaz trošenja u usporedbi s veličinom abrazivnog zrna [7]	10
Slika 8.	Ovisnost volumena trošenja u odnosu na veličinu abrazivnog zrna [8]	11
Slika 9.	Shematski prikaz uređaja za provođenje ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ [10]	13
Slika 10.	Shematski prikaz ispitivanja otpornosti na abraziju na uređaju Taber abrader [11]	15
Slika 11.	Mikrostruktura čelika Hardox 500 i mikrostruktura čelika 20MnCr5 [15]	18
Slika 12.	Mikrostruktura čelika Hardox 400 i mikrostruktura čelika S700MC [24]	21
Slika 13.	Mjesto izrezivanja uzoraka čelika Hardox 450	24
Slika 14.	Mjesto izrezivanja uzoraka čelika XAR 450	24
Slika 15.	Uređaj za kemijsku analizu GDS 850A, LECO	25
Slika 16.	Komora za kemijsku analizu uređaja GDS 850A, LECO	26
Slika 17.	Uzorci čelika Hardox 450 i XAR 450 nakon kemijske analize	26
Slika 18.	Zaliveni uzorci čelika Hardox 450 i čelika XAR 450	27
Slika 19.	Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće Instron Wilson-Wolpert Tukon 2100B	28
Slika 20.	Uređaj za mjerenje tvrdoće Zwick/Roell ZHV μ	29
Slika 21.	Laboratorijska vaga za mjerenje gustoće Mettler Toledo	30
Slika 22.	Uzorci za određivanje gustoće	30
Slika 23.	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abraziju metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	32
Slika 24.	Ispjeskareni uzorci čelika Hardox 450 i XAR 450	32
Slika 25.	Držači za uzorke	33
Slika 26.	Položaj ispitnog uzorka u držaču	33

Slika 27.	Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	34
Slika 28.	Važniji dijelovi uređaja za ispitivanje abrazijskog trošenja	35
Slika 29.	Ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	36
Slika 30.	Abradirana površina uzoraka čelika Hardox 450 nakon ispitivanja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	36
Slika 31.	Abradirana površina uzoraka čelika XAR 450 nakon ispitivanja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	37
Slika 32.	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader prije brušenja površine	38
Slika 33.	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader nakon brušenja površine	39
Slika 34.	Uređaj Taber abrader	39
Slika 35.	Položaj uzorka u odnosu na abrazivni papir prilikom ispitivanja na uređaju Taber abrader	40
Slika 36.	Mikrostruktura čelika Hardox 450 u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 200×	43
Slika 37.	Mikrostruktura čelika XAR 450 u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 200×	44
Slika 38.	Mikrostruktura uzdužnog presjeka čelika Hardox 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×	44
Slika 39.	Mikrostruktura poprečnog presjeka čelika Hardox 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×	45
Slika 40.	Mikrostruktura presjeka paralelnog s površinom čelika Hardox 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×	45
Slika 41.	Mikrostruktura uzdužnog presjeka čelika XAR 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×	46
Slika 42.	Mikrostruktura poprečnog presjeka čelika XAR 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×	46
Slika 43.	Mikrostruktura presjeka paralelnog s površinom čelika XAR 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×	47
Slika 44.	Usporedba rezultata mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	56
Slika 45.	Usporedba rezultata mjerenja tvrdoće HV1	56

Slika 46.	Usporedba rezultata mjerenja makrotvrdoće HV2.....	57
Slika 47.	Usporedba gubitka volumena za čelik Hardox 450 i čelik XAR 450 pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“.....	58
Slika 48.	Usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader čelika Hardox 450 i XAR 450.....	59
Slika 49.	Utjecaj veličine abrazijskog zrna na gubitak volumena čelika Hardox 450 i XAR 450.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Varijante postupka ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ [10]	14
Tablica 2. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje razreda tvrdoće od 450 HB [16–20].....	19
Tablica 3. Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje razreda tvrdoće od 450 HB [16–20].....	20
Tablica 4. Oznake brusnih papira prema ISO/FEPA standardu.....	40
Tablica 5. Kemijski sastav čelika Hardox 450.....	42
Tablica 6. Kemijski sastav čelika XAR 450	42
Tablica 7. Izmjerena mikrotvrdoća HV _{0,2} za čelik Hardox 450	48
Tablica 8. Izmjerena mikrotvrdoća HV _{0,2} za čelik XAR 450.....	48
Tablica 9. Izmjerena tvrdoća HV ₁ za čelik Hardox 450	49
Tablica 10. Izmjerena tvrdoća HV ₁ za čelik XAR 450.....	49
Tablica 11. Izmjerena tvrdoća HV ₂ za čelik Hardox 450	50
Tablica 12. Izmjerena tvrdoća HV ₂ za čelik XAR 450.....	50
Tablica 13. Rezultati određivanja gustoće	50
Tablica 14. Gubitak mase obaju ispitivanih čelika pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	51
Tablica 15. Gubitak volumena obaju ispitivanih čelika pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“	52
Tablica 16. Gubitak mase čelika Hardox 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader	53
Tablica 17. Gubitak mase čelika XAR 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader.....	53
Tablica 18. Gubitak volumena čelika Hardox 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader...54	
Tablica 19. Gubitak volumena čelika XAR 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
A	%	istezljivost
d_{krit}	μm	kritična veličina abrazivnog zrna
F_N	N	normalna komponenta sile
F_T	N	tangencijalna komponenta sile
HB		tvrdoća po Brinellu
HV		tvrdoća po Vickersu
m	g	masa uzorka
R_e	N/mm^2	granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm^2	konvencionalna granica razvlačenja
V	mm^3	volumen uzorka
Δm	g	gubitak mase uzorka
ΔV	mm^3	gubitak volumena uzorka
ρ	g/cm^3	gustoća

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Američko društvo za ispitivanje i materijale
FEPA	<i>Federation of European Producers of Abrasives</i> – Savez europskih proizvođača abraziva
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju

SAŽETAK

Cilj ovoga diplomskoga rada bio je odrediti i usporediti mikrostrukturu, tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje dvaju konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja – čelika Hardox 450 i čelika XAR 450. Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ te na uređaju Taber abrader.

Oba čelika imaju sličnu homogenu sitnozrnatu martenzitnu mikrostrukturu.

Kod obaju čelika dobivene su podjednake vrijednosti tvrdoće HV2 u svim karakterističnim presjecima ploče. Vrijednosti tvrdoća HV0,2 i HV1 nešto su više od vrijednosti tvrdoće HV2, no puno veća su i rasipanja rezultata.

Ispitivanje otpornosti na abraziju metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ pokazuje da čelik Hardox 450, u odnosu na čelik XAR 450, ima manji gubitak volumena za oko 8 %, ali rasipanja rezultata kod ovog čelika su puno veća nego kod čelika XAR 450.

Pri ispitivanju otpornosti na abraziju na uređaju Taber abrader, oba čelika pokazala su vrlo sličnu otpornost. Također, kod obaju čelika može se uočiti fenomen „kritične veličine abrazivnog zrna“. Kritična veličina abrazivnog zrna slična je kod oba čelika i nalazi se između 21,8 μm i 30,2 μm .

Ključne riječi: konstrukcijski čelici, otpornost na abrazijsko trošenje, tvrdoća

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to determine and compare microstructure, hardness and resistance to abrasion wear of two structural steels of improved resistance to the abrasion wear mechanism – the Hardox 450 steel and the XAR 450 steel. The abrasion resistance test was carried out using the standard "dry sand – rubber wheel" method and on the Taber abrader.

Both steels have a similar homogeneous fine-grained martensitic microstructure.

In both steels, equal values of HV2 hardness were obtained in all characteristic sections of the plate. The hardness values of HV0.2 and HV1 were slightly higher than the value of HV2 hardness, but the scattering of results was much higher.

Abrasion resistance testing using the "dry sand - rubber wheel" method shows that the Hardox 450 steel, compared to the XAR 450 steel, has a lower volume loss of about 8 %, but the scattering of results in this steel was much higher than in steel XAR 450.

When testing abrasive wear resistance on the Taber abrader, both steels showed very similar resistance. Also, in both steels, the phenomenon of "critical size of abrasive grain" can be observed. The critical size of the abrasive grain is similar in both steels and is located between 21.8 μm and 30.2 μm .

Key words: structural steels, abrasion wear resistance, hardness

1. UVOD

Trošenje materijala je nepoželjan proces koji može dovesti do smanjenja vijeka trajanja ili prestanka funkcije dijelova tehničkih sustava. Trošenje se javlja kao posljedica doticaja materijala, pri relativnom gibanju, s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama [1]. Trošenje se može podijeliti na četiri osnovna mehanizma: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija, a najučestaliji mehanizam trošenja je abrazija [1].

Otpornost na abrazijski mehanizam trošenja temelji se na tvrdoći materijala. Ukoliko materijal ima tvrdi mikrostrukturu, to će abrazijskim česticama biti teže prodrijeti u materijal i istisnuti česticu trošenja [2].

Konstruktivski čelici često su izloženi abrazijskom trošenju, a također podnose statička i dinamička, kratkotrajna i dugotrajna opterećenja. Dobra zavarljivost je također bitna za ovu skupinu čelika. U jednom istom materijalu izuzetno je teško postići kombinaciju svojstava koja bi zadovoljavala postavljene zahtjeve na konstrukcijske čelike od kojih se traži povećana otpornost na trošenje.

Kombinacija svojstava, koja bi zadovoljila tražene zahtjeve kod ovih čelika, postiže se odgovarajućim kemijskim sastavom i odgovarajućom toplinskom obradom. Najbolja svojstva postižu se kaljenjem i popuštanjem čelika s niskim udjelom ugljika. Martenzit je tvrda faza koja osigurava tvrdoću, a samim time i otpornost na abrazijski mehanizam trošenja. Popuštanjem martenzita smanjuje se tvrdoća, ali se povećava žilavost koja je također vrlo važna za ovu skupinu čelika. Sitni i fino dispergirani karbidi također pridonose poboljšanju svojstava. Sastav, struktura i svojstva ovih čelika mogu varirati s obzirom na dimenzije poluproizvoda. Osim martenzita u mikrostrukturi konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja može biti i određena količina bainita, ferita, perlita i zaostalog austenita [3].

2. TROŠENJE

Tijekom svog životnog vijeka, različiti strojni dijelovi nalaze se u dinamičkom dodiru s drugim dijelovima, krutim česticama i kapljevinaama što može izazvati mehaničko trošenje njihovih površina [1].

S obzirom da je trošenje kompleksna pojava, postoje razne podjele trošenja. Tako se trošenje može podijeliti u kategorije prema vrsti međusobnog dodira, jačini trošenja, relativnom gibanju ili prema mehanizmu odvajanja čestica trošenja [3].

Trošenje se općenito može podijeliti na četiri osnovna mehanizma trošenja, a to su:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija [1].

Svaki od navedenih mehanizama trošenja može se razložiti na jedinične događaje. Jedinični događaj predstavlja tijek događaja uslijed kojeg dolazi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. Jedinični događaj obuhvaća proces nastajanja i napredovanja pukotina [1].

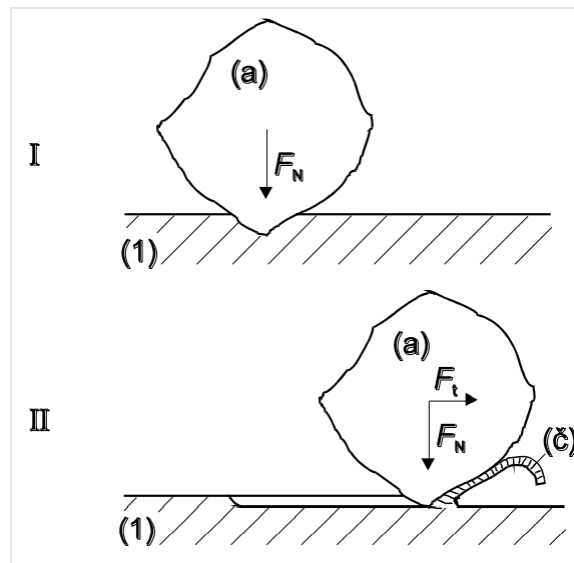
2.1. Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje može se definirati kao istiskivanje materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama, pri relativnom gibanju, na jednoj ili na obje površine [2].

Abrazijsko trošenje može se definirati i kao mikrorezanje abrazivnom česticom nedefinirane geometrije rezne oštrice [4].

Jedinični događaj abrazivnog trošenja može se razdvojiti na dvije faze. Prva faza (I) predstavlja prodiranje abrazivne čestice u površinu materijala uslijed djelovanja normalne komponente opterećenja F_N . Druga faza (II) označava proces istiskivanja materijala s površine u obliku čestica trošenja pri djelovanju tangencijalne komponente opterećenja F_T [1].

Slika 1. shematski prikazuje jedinični događaj abrazijskog trošenja [1].



Slika 1. Shematski prikaz jediničnog događaja abrazivnog trošenja [1]

U industrijskim uvjetima abrazijski mehanizam trošenja je vrlo čest slučaj. Procjenjuje se da je u oko 50 % slučajeva trošenja riječ o abrazijskom trošenju. Kao posljedica velikog broja slučajeva abrazijskog trošenja, u praksi se razlikuju različite vrste trošenja [5].

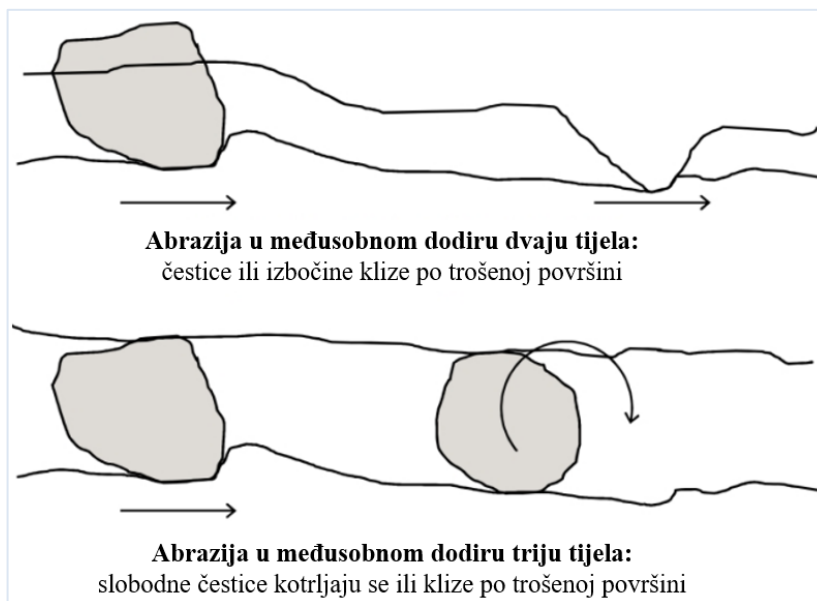
Tako se abrazijsko trošenje može podijeliti ovisno o:

- strukturi tribosustava
- međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine
- međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala [1].

Ovisno o strukturi tribosustava, abrazijsko trošenje može se podijeliti na:

- trošenje u međusobnom dodiru dvaju tijela
- trošenje u međusobnom dodiru triju tijela [2].

U slučaju abrazijskog trošenja u međusobnom dodiru dvaju tijela, abrazivne čestice slobodno se kreću po površini materijala, slika 2. Kod abrazijskog trošenja u međusobnom dodiru triju tijela, čestice (međutijela) nalaze se između abrazivnog tijela i protutijela [3].



Slika 2. Shematski prikaz abrazije u međusobnom dodiru dvaju i triju tijela [3]

Ovisno o mehanizmu odnošenja materijala s abradirane površine razlikujemo četiri mikromehanizma:

- mikrobrazdanje
- mikrorezanje
- mikronaprnuća
- mikroumor [2].

Mikrobrazdanje je mikromehanizam abrazijskog trošenja kod kojeg dolazi do plastične deformacije prilikom prolaska jedne abrazivne čestice, a odnošenje materijala proporcionalno je volumenu nastale brazde. Rubovi brazde odvajaju se od površine tvoreći tako produkte trošenja, odnosno čestice trošenja [1].

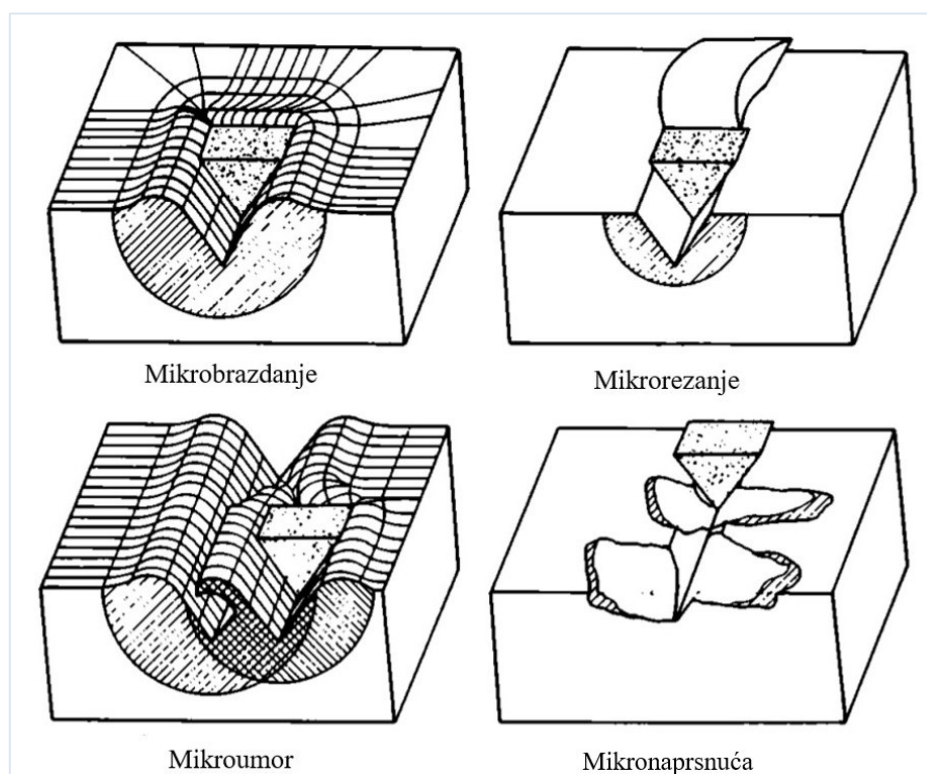
Idealni slučaj mikrobrazdanja jest kada abrazijska čestica ne proizvodi produkte trošenja, već je materijal potisnut u stranu [1].

Mikrorezanje je mikromehanizam abrazijskog trošenja pri kojem dolazi do odnošenja materijala prolaskom jedne abrazivne čestice u obujmu nastalog zareza [1].

Mikronaprnuća obuhvaćaju odnošenje velikih djelića materijala mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina s krhke površine [1].

Mikroumor predstavlja mikromehanizam abrazijskog trošenja pri kojem dolazi do odnošenja materijala mehanizmom umora površine. Odošenje materijala nastaje uslijed učestalog izmjeničnog koncentriranog opterećenja. Kao posljedica izloženosti materijala trenutnim deformacijama nastaju mikropukotine koje se šire i dovode do odvajanja dijelova materijala s površine. Također, mikroumor može biti uzrokovan i učestalim višestrukim mehanizmom mikrobrazdanja [1].

Slika 3. shematski prikazuje četiri mikromehanizma abrazijskog trošenja [2].



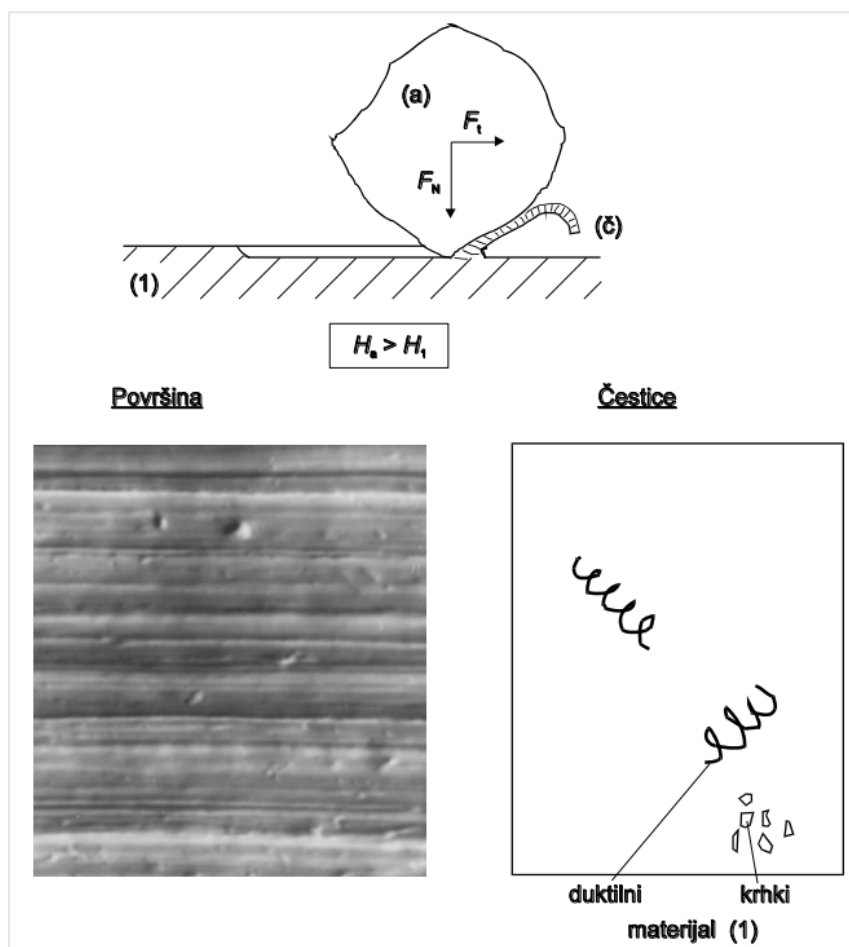
Slika 3. Shematski prikaz mikromehanizama abrazijskog trošenja [2]

Abrazijsko trošenje, ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i tvrdoće materijala, može se podijeliti na tri tipa abrazije:

- „čista” abrazija
- selektivna abrazija
- „nulta” abrazija [1].

„Čista abrazija“ je slučaj abrazijskog trošenja pri kojem je tvrdoća abrazivne čestice veća od tvrdoće trošenog materijala. Trošena površina je izbrazdana, a čestice nastale procesom trošenja su spiralnog oblika ili u obliku lomljene strugotine, ovisno o duktilnosti abradiranog materijala [1].

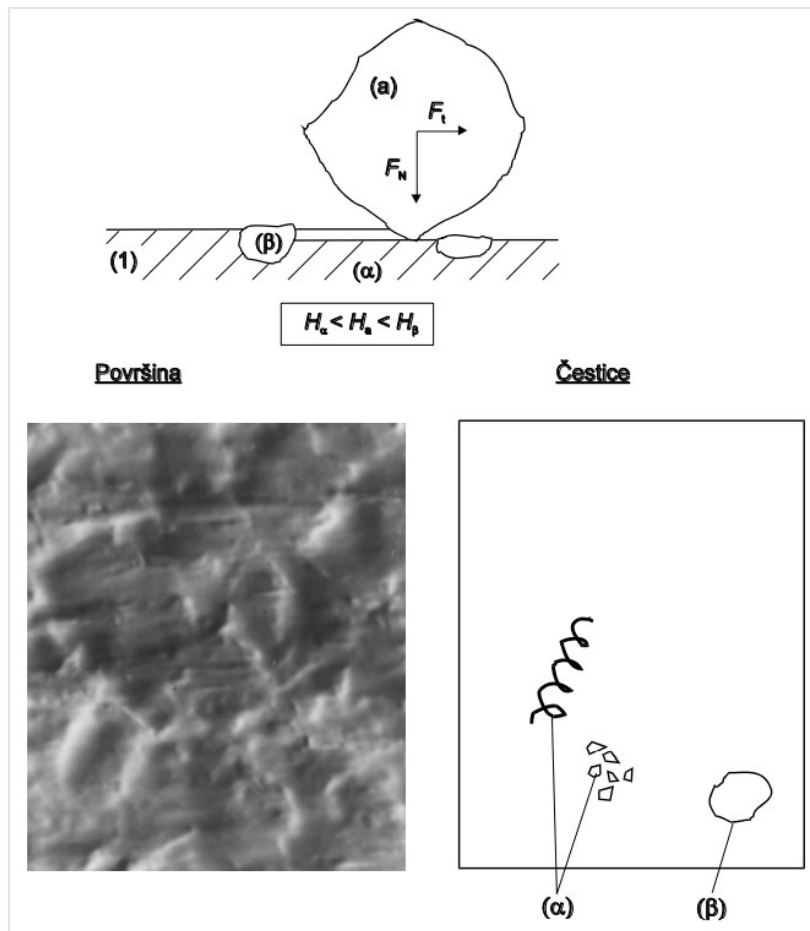
Slika 4. shematski prikazuje „čistu“ abraziju [1].



Slika 4. Shematski prikaz „čiste“ abrazije [1]

Selektivna abrazija je slučaj abrazijskog mehanizma trošenja koji se pojavljuje kod materijala koji se sastoji od više faza. Kada u abradiranom materijalu postoji faza veće tvrdoće od tvrdoće abraziva, tada abrazivna čestica troši samo mekšu fazu. Površina abradiranog materijala je izbrazdana. Brazde su isprekidane na mjestima gdje se nalaze trake ili zrna tvrde faze u materijalu [1].

Slika 5. shematski prikazuje selektivnu abraziju [1].

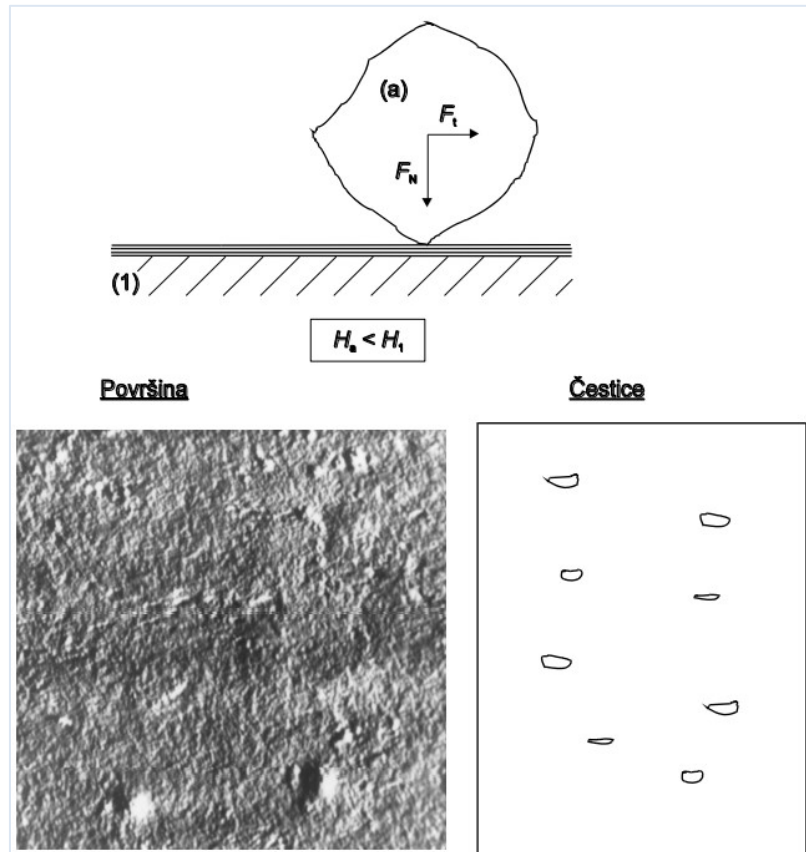


Slika 5. Shematski prikaz selektivne abrazije [1]

„Nulta“ abrazija je slučaj abrazijskog mehanizma trošenja kada je cijela površina abradiranog materijala veće tvrdoće od tvrdoće abraziva. Tada površina poprima poliran izgled, a čestice trošenja su u obliku sitnih ljuskica koje potječu iz vanjskog graničnog sloja [1].

Nulta abrazija najčešće se javlja kod površina koje su prevučene različitim prevlakama ili su oplemenjene termokemijskim postupcima. Te prevlake i slojevi imaju vrlo visoku tvrdoću (višu od tvrdoće abraziva) i pri dinamičkom kontaktu ne dolazi do njihovog trošenja [1].

Slika 6. shematski prikazuje „nultu“ abraziju [1].



Slika 6. Shematski prikaz „nulte“ abrazije [1]

2.1.1. Otpornost na abrazijski mehanizam trošenja

Otpornost prodiranja abrazivne čestice u površinu materijala temelji se na međusobnom omjeru mikrotvrdoće abrazivne čestice i mikrotvrdoće abradirane površine. Drugim riječima, teži se što većoj mikrotvrdoći abradirane površine kako bi abrazivnoj čestici bilo teže prodrijeti u površinu materijala [4].

Na otpornost materijala da se prilikom abrazijskog trošenja istisne u obliku čestica trošenja najviše utječe čimbenik propagacije pukotine koji može biti krhki ili duktilni, a može nastati i umor površine [4].

2.1.2. Kritična veličina abrazivnog zrna

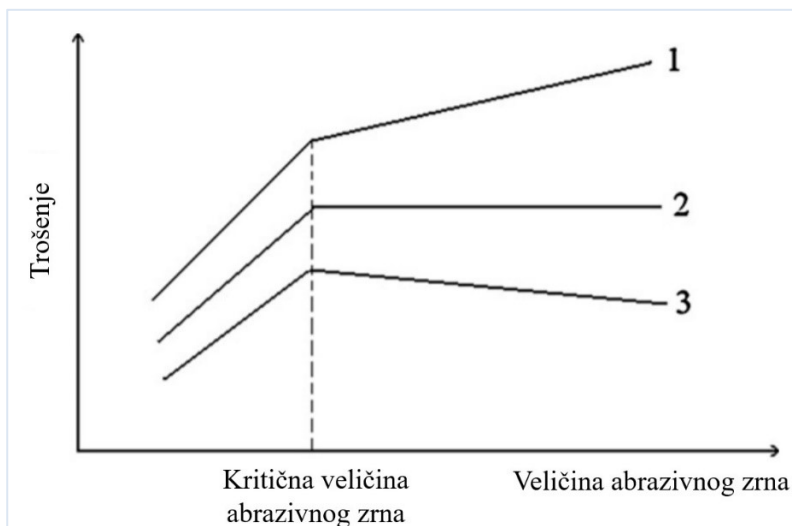
Pri abrazijskom trošenju, karakteristike abrazivnog zrna imaju veliki utjecaj na intenzitet i tijek procesa trošenja. Veličina abrazivnog zrna je u linearnoj ovisnosti s gubitkom mase trošenog materijala sve do kritične veličine abrazivnog zrna d_{krit} (engl. *critical particle size* – CPS). Ako veličina abrazivnog zrna prijeđe granicu kritične veličine abrazivnog zrna, tada se mijenja ovisnost između veličine abrazivne čestice i gubitka mase trošenog materijala [6], [7].

Postoje tri moguće promjene:

1. nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna, gubitak mase se i dalje povećava, ali u znatno manjoj mjeri
2. nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna gubitak mase trošenog materijala ostaje konstantan
3. nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna gubitak mase trošenog materijala se smanjuje [6], [7]

Ovaj fenomen prisutan je kod abrazijskog trošenja u međusobnom dodiru dvaju tijela, abrazije u dodiru triju tijela, kod erozivnog trošenja te kod obrade odvajanjem čestica [7].

Slika 7. prikazuje sva tri osnovna načina napredovanja gubitka mase trošenog materijala nakon dostizanja kritične veličine abrazivnog zrna [7].

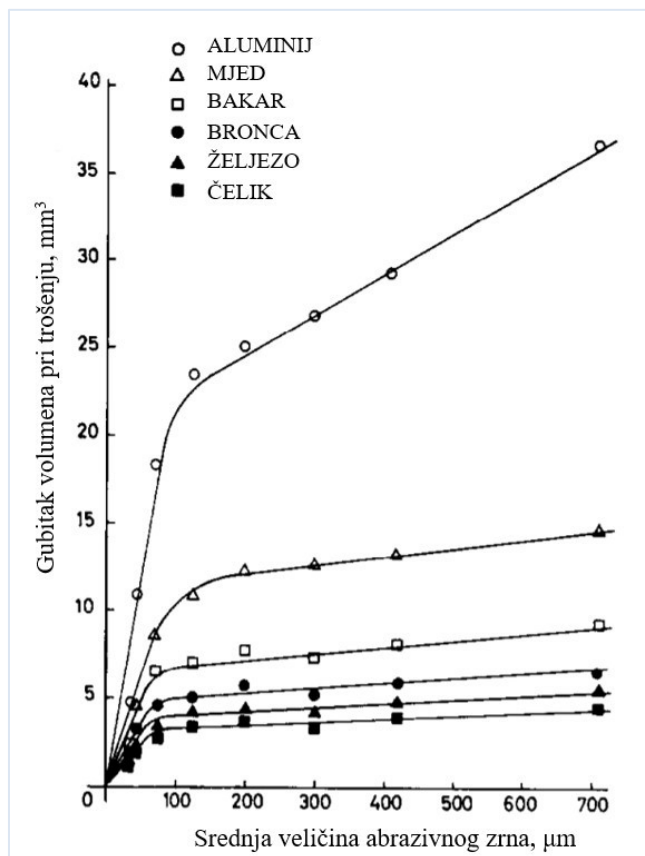


Slika 7. Shematski prikaz trošenja u usporedbi s veličinom abrazivnog zrna [7]

U znanstvenom radu pod nazivom „The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions“ znanstvenici Nathan G.K. i Jones W.J.D proučavali su utjecaj promjene srednjeg promjera abrazivne čestice na abrazijski mehanizam trošenja nekoliko različitih vrsta materijala. Materijali na kojima provedeno ispitivanje bili su: aluminij, mjed, bakar, bronca, željezo te čelik, a korištene abrazivne čestice bile su silicijev karbid. Provedeno je ispitivanje trošenja u međusobnom dodiru dvaju tijela, dakle tribosustav se sastojao od abrazivnog tijela i abrazivnog protutijela [8].

Slika 8. prikazuje rezultate ispitivanja [8].

Dobiveni rezultati ukazuju na to da volumen trošenja svih abradiranih materijala linearno raste do veličine abrazivnog zrna od $\sim 70 \mu\text{m}$. Između 70 i $150 \mu\text{m}$ nagib krivulje pada, dok povećanjem srednjeg promjera abrazivnog zrna preko $150 \mu\text{m}$ ponovno dolazi do linearne ovisnosti, no sa znatno manjim nagibom u odnosu na nagib prije dostizanja kritične veličine abrazivnog zrna [8].



Slika 8. Ovisnost volumena trošenja u odnosu na veličinu abrazivnog zrna [8]

3. STANDARDNE METODE ZA ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE

Postoji mnogo standardnih metoda za ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja, no u ovom radu biti će detaljno objašnjene sljedeće dvije metode:

- „Suhi pijesak – gumeni kotač“
- Taber abrader

3.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje „suhi pijesak – gumeni kotač“ opisana je u standardu ASTM G65-94. Navedena metoda obično se koristi za procjenu abrazijskog trošenja u međusobnom dodiru triju tijela pri niskom opterećenju [4], [9], [10].

Ispitivanje ovom metodom provodi se tako da se uzorak postavlja uz rub rotirajućeg gumenog kotača; pijesak se kroz sapnicu ispušta između kotača i uzorka, prolazi preko uzorka i na taj način ga abradira [9]. Ova ispitna metoda učestalo se koristi radi rangiranja materijala od kojih se izrađuju dijelovi strojeva i alata čija će površina tijekom eksploatacije biti izložena abrazijskom trošenju [9], [10]. Abrazijska otpornost ispitivanih materijala uspoređuje se preko gubitka volumena.

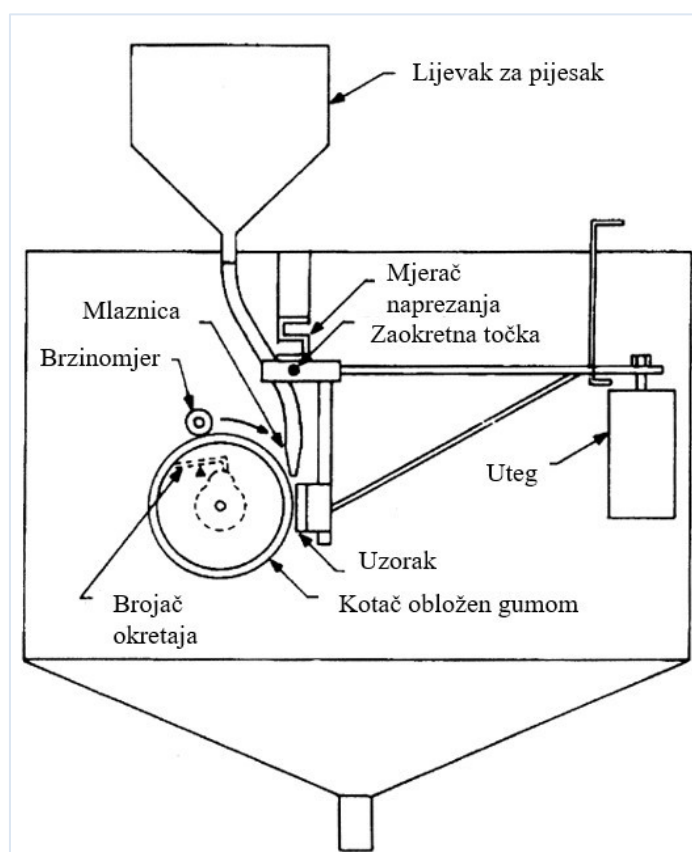
Ispitna metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ je brza metoda i daje razumnu korelaciju između rezultata ispitivanja i stvarnog trošenja tijekom eksploatacije [9], [10].

3.1.1. Uzorci i oprema za metodu „suhi pijesak – gumeni kotač“

Osnovni uređaj za provođenje ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ sastoji se od čeličnog kotača s gumenim obodom dimenzija $\varnothing 228 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$. Spremnik pijeska spojen je na mlaznicu koja omogućuje protok pijeska preko cijevi koja ima dovoljno veliki promjer da pijesak u slobodnom padu nesmetano teče kroz nju. Uzorak se naslanja na gumeni kotač preko sustava poluga, a sila kojom je uzorak pritisnut na kotač određuje se preko utega odgovarajuće mase. Na uređaju se nalazi i brojač okretaja koji zaustavlja pogonski motor nakon postizanja definiranog broja okretaja [10].

Mora biti poznata i gustoća ispitivanog materijala kako bi se mogao izračunati gubitak volumena materijala nakon ispitivanja. Gubitak volumena izračunava se iz gubitka mase i gustoće materijala. Ispitivanje se provodi samo jednom ili se ponavlja više puta pri čemu koeficijent varijacije ne smije prelaziti 7 % (što je propisano normom) [10].

Slika 9. shematski prikazuje ispitni uređaj za provođenje ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ [10].



Slika 9. Shematski prikaz uređaja za provođenje ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ [10]

Epruvete koje se koriste za ovo ispitivanje trebaju imati dimenzije $12 \times 25 \times 75$ mm [4]. Normom je propisana i vrsta pijeska koja se koristi pri ispitivanju. To je standardni zaobljeni kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70, čija veličina zrnaca mora biti između 212 i 300 μm , a brzina protoka pijeska ograničena je između 250 i 400 g/min [4].

Kotač je obložen gumom čija tvrdoća iznosi oko 60 Shore A. Ispitni uzorak pritišće se na kotač preko koljenaste poluge silom od 45 N ili 130 N. Iznos sile određuje se preko mase utega, a ovisi o varijanti postupka [4], [10].

3.1.2. Postupak provođenja ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“

Oprema za provođenje ispitivanja ima dva ispitna parametra: broj okretaja kotača i opterećenje uzorka. Shodno tome, razlikuju se četiri moguće varijante [10].

Tablica 1. prikazuje varijante postupka ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ [10].

Tablica 1. Varijante postupka ispitne metode „suhi pijesak – gumeni kotač“ [10]

Varijanta postupka	Sila na uzorak N	Broj okretaja kotača	Abradirana duljina m
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309

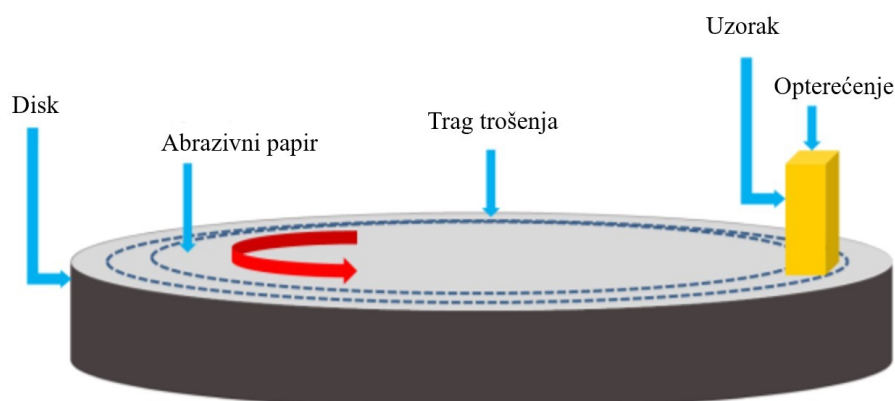
Provođenje ispitivanja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ sastoji se od osam koraka:

1. Čišćenje i vaganje uzorka
2. Postavljanje ispitnog uzorka i pričvršćivanje u čeljust
3. Pokretanje protoka pijeska
4. Pokretanje gumenog kotača
5. Stavljanje uzorka u kontakt s rotirajućim kotačem
6. Zaustavljanje protoka pijeska i motora
7. Odmicanje i skidanje ispitnog uzorka
8. Čišćenje i ponovno vaganje [10].

3.2. Ispitivanje Taber abraderom

Uređaj Taber abrader koristi se za ispitivanje otpornosti na trošenje ravnih uzoraka [4]. Osnovni dijelovi uređaja su rotirajući disk i držač uzorka. Na disk se postavlja abrazivni papir određene granulacije abrazivnih čestica.

Slika 10. shematski prikazuje ispitivanje otpornosti na abraziju na uređaju Taber abrader [11].



Slika 10. Shematski prikaz ispitivanja otpornosti na abraziju na uređaju Taber abrader [11]

Disk na kojem se nalazi abrazivni papir rotira brzinom od 60 okretaja u minuti. Tijekom ispitivanja uzorak miruje, a disk s abrazivnim papirom rotira, uslijed čega dolazi do abrazije uzorka u njihovoj dodirnoj liniji. Sila kojom je uzorak pritisnut iznosi 4,91 N, a dimenzije uzorka određene su otvorima na držaču.

Trag koji na brusnom papiru nastaje kao posljedica abrazijskog trošenja ima oblik prstena [4]. Uzorak se važe prije i nakon ispitivanja na Taber abrader uređaju kako bi se mogao odrediti gubitak materijala uslijed trošenja [4]. Tijekom ispitivanja potrebno je ukloniti produkte trošenja koji ostaju na brusnom papiru.

4. SVOJSTVA KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA POBOLJŠANE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE

Konstruktivski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje koriste se u raznovrsnim primjenama gdje je dominantni mehanizam dotrajavanja materijala mehaničko istrošenje. Njihovom primjenom može se usporiti abrazijsko trošenje konstrukcijskih i strojnih dijelova čime se produljuje njihov vijek trajanja [12].

Postoje mnoge vrste čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje, a općenito se mogu podijeliti na:

- manganske čelike
- nisko i srednje legirane čelike
- čelike legirane kromom i molibdenom
- čelike otporne na kavitaciju
- posebne vrste čelika otporne trošenju [12].

Otpornost materijala na abrazijski mehanizam trošenja ne može se definirati kao svojstvo materijala, a uvelike ovisi o čimbenicima koji utječu na tribosustav [12].

Čimbenici koji utječu na otpornost materijala na abrazijski mehanizam trošenja mogu se kategorizirati u dvije kategorije – unutarnji čimbenici i vanjski čimbenici [12].

Unutarnji čimbenici su prije svega kemijski sastav i mikrostruktura trošenog materijala [12].

Vanjski čimbenici obuhvaćaju karakteristike tribosustava, abrazivne čestice, međusobni kontakt abrazivne čestice i trošene površine, brzinu relativnog gibanja, medij, temperaturu i slično [12].

U radu pod nazivom „Abrasion Resistance of S235, S355, C45, AISI 304 and Hardox 500 Steels with Usage of Garnet, Corundum and Carborundum Abrasives“ autora Szala M., Szafran M., Macek W., Marchenko S., Hejwowski, T., provedena su ispitivanja otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja na pet različitih vrsta čelika, a ispitivanja su provedena na tri vrste abrazivnih čestica: granat, korund i karborund [13].

Ispitivanje je provedeno standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ na slijedećim čelicima: ugljični čelik C45, nehrđajući visokolegirani čelik X5CrNi18–10, opće konstrukcijski čelici S235JR i S355J2 te čelik poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje Hardox 500. Ispitivanje je pokazalo da otpornost na abrazijsko trošenje svake ispitivane vrste čelika u znatnoj mjeri ovisi o vrsti korištenog abraziva [13].

Rezultati brojnih ispitivanja pokazuju da se odgovarajućom kombinacijom visoke tvrdoće i žilavosti može utjecati na otpornost na abrazijski mehanizam trošenja [12]. Pritom treba voditi računa o abrazivnim uvjetima, odnosno o karakteristikama samog tribološkog sustava koje mogu biti vrlo raznolike i utjecati na ponašanje materijala [3].

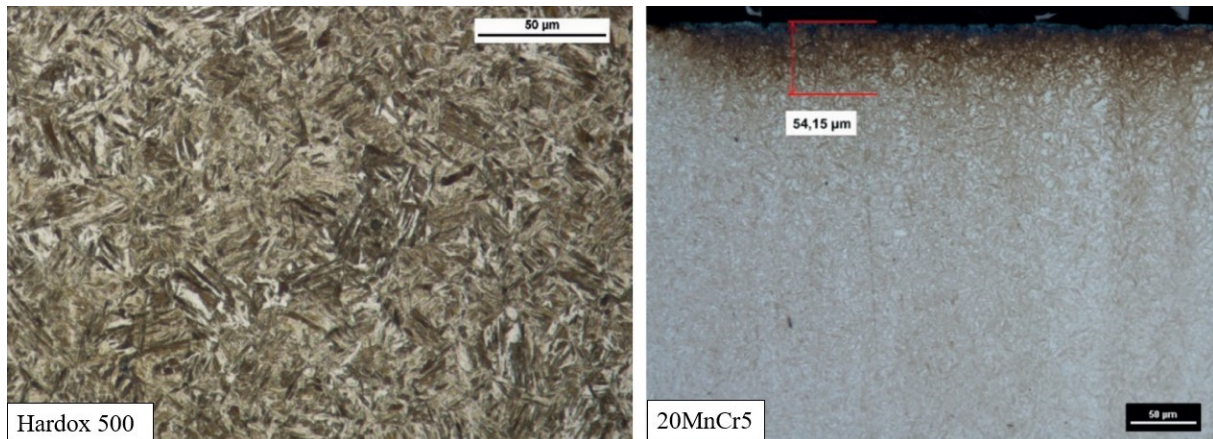
Kako opći konstrukcijski čelici u oznaci čelika imaju granicu razvlačenja R_e , tako su komercijalne grupe čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja kategorizirane prema tvrdoći te u svojoj oznaci imaju tvrdoću (400 HB, 500 HB, 600 HB). Razlog tome je povezanost tvrdoće materijala i otpornosti na trošenje [3].

U znanstvenom radu pod nazivom „Investigation of the wear resistance of Hardox steel plates“ autora Beköz Üllen N., ispitivana je abrazijska otpornost tri vrste Hardox čelika (Hardox 400, 450 i 500) [14]. Izmjerena je tvrdoća po Brinellu, analizirana mikrostruktura te je provedeno ispitivanje otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“. Ispitivanja su pokazala da čelik Hardox 500 ima najveću tvrdoću te najmanji gubitak volumena pri ispitivanju na abraziju, odnosno čelik Hardox 500 pokazuje najbolju otpornost na abrazijski mehanizam trošenja [14].

U znanstvenom radu pod nazivom „Comparison of the wear resistance of Hardox 500 steel and 20MnCr5“ autora Tarasiuk W., Napiórkowski J., Ligier K., Krupicz B., određena je i uspoređena otpornost na trošenje čelika Hardox 500 i niskolegiranog čelika 20MnCr5, koji je prethodno cementiran [15].

Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je metodom „pin-on-disc“. Dobiveni rezultati pokazuju da čelik Hardox 500 ima manju tvrdoću za oko 12 % od vanjskog sloja cementiranog čelika 20MnCr5. Međutim, čelik Hardox 500 pokazao je bolju otpornost na abrazijsko trošenje od čelika 20MnCr5 [15].

Slika 11. prikazuje martenzitnu mikrostrukturu čelika Hardox 500 i mikrostrukturu cementiranog čelika 20MnCr5 [15].



Slika 11. Mikrostruktura čelika Hardox 500 i mikrostruktura čelika 20MnCr5 [15]

Proces proizvodnje čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja može se značajno razlikovati između pojedinih proizvođača, isto kao i kemijski sastav. Maseni udio ugljika i stupanj legiranosti čelika ovisi o željenoj debljini čelične ploče ili lima. Kako bi se postigla što viša tvrdoća čelika, stupanj legiranosti čelika je to viši što je debljina ploče veća [3].

Tablica 2. prikazuje kemijski sastav pojedinih komercijalnih konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje razreda tvrdoće od 450 HB.

Na temelju podataka u tablici, može se zaključiti da se navedeni čelici razlikuju po vrsti i udjelu legiranih elemenata.

Tablica 2. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje razreda tvrdoće od 450 HB [16–20]

Maseni udjeli elemenata, % (maks.)										
Vrsta čelika	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Ostalo
Hardox 450 [16]	0,26	0,7	1,6	0,022	0,010	1,4	1,5	0,60	0,005	
Xar 450 [17]	0,22	0,8	1,5	0,020	0,010	1,3	1,5	0,50	0,005	
Raex 450 [18]	0,26	0,8	1,7	0,025	0,015	1,5	1,0	0,50	0,005	
Dillidur 450 [19]	0,25	0,7	1,6	0,025	0,010	1,5	0,8	0,50	0,005	*
Brinar 450 [20]	0,21	0,5	1,8	0,015	0,005	1,5	1,5	0,50	0,005	Al 0,015

* Cu 0,30 + V 0,08 + Nb 0,05

Učinci legirnih elemenata na otpornost na abrazijski mehanizam trošenja materijala proizlaze iz njihova učinka na mikrostrukturu.

Čelik poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja trebao bi sadržavati dovoljnu količinu ugljika, kroma, nikla, molibdena i bora, a moguće je dodati i neke druge elemente u manjim udjelima. Međutim, legiranjem se može postići veća tvrdoća i samim time veća otpornost na abrazijski mehanizam trošenja, no istovremeno se može smanjiti otpornost na neke druge mehanizme trošenja [3].

Dodatak navedenih elemenata koji potiču precipitacijsko očvršnuće formiranjem precipitata karbida uzrokuje porast tvrdoće, a shodno tome i poboljšavanje otpornosti na abraziju [21].

Silicij je dezoksidirajući element i uvijek je prisutan u čelicima. Silicij kao legirni element povišuje čvrstoću i otpornost na trošenje [22].

Mangan je dezoksidirajući legirni element koji na sebe veže sumpor. Povišuje granicu razvlačenja te ima pozitivan učinak na žilavost [22].

Krom je jaki karbidotvorni element i tvori tvrde karbide koji povećavaju otpornost na abrazijski mehanizam trošenja [22].

Nikal u obliku legirnog elementa služi za poboljšanje mikrostrukture, jačanje strukture matrice i povećanje žilavosti. Ne tvori karbide, već se otapa u rešetki željeza [22], [23].

Molibden, kao legirni element, je jak karbidotvorac koji potiče precipitacijsko očvršnuće i poboljšava tvrdoću, a samim time poboljšava i otpornost na abrazijsku. Povoljno djeluje na povišenje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, granice puzanja i formiranje sitnozrnate mikrostrukture [22], [23].

Konačna čvrstoća, tvrdoća i žilavost kaljenih martenzitnih čelika može se prilagoditi popuštanjem [3].

Mnoge vrste konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja isporučuju se u kaljenom ili u popuštenom stanju [3].

Tablica 3. predstavlja neke od mehaničkih svojstava konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja razreda tvrdoće od 450 HB.

Tablica 3. Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje razreda tvrdoće od 450 HB [16–20]

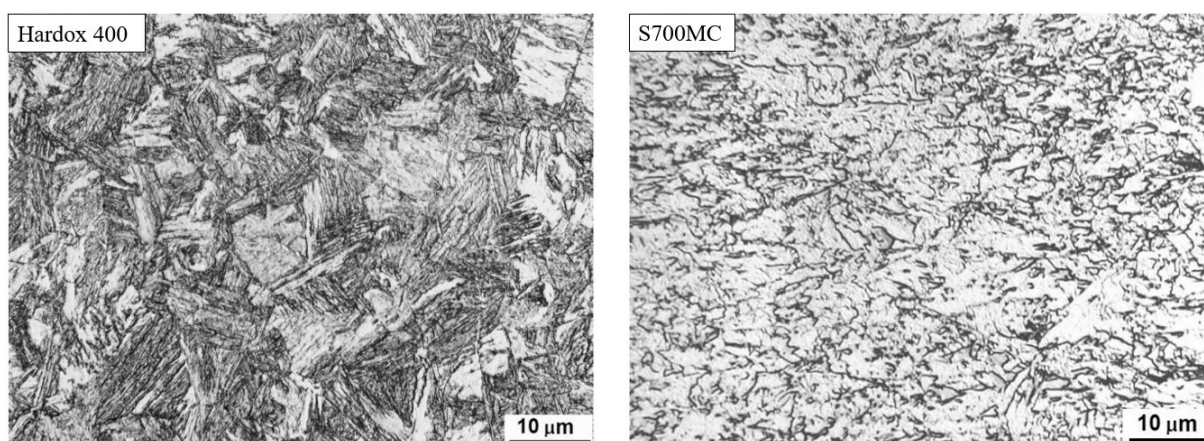
Vrsta čelika	Debljina ploče mm	Tvrdoća HB	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Istezljivost A %	Udarni rad loma J
Hardox 450 [16]	3,2 - 80,0	425 - 475	1250	-	-	50 (-40 °C)
Xar 450 [17]	8,0 - 100,0	420 - 480	1200	1450	10	40 (-40 °C)
Raex 450 [18]	6,0 - 80,0	420 - 500	1200	1450	9	30 (-40 °C)
Dillidur 450 [19]	8,0 - 100,0	420 - 480	950	1400	11	35 (-20 °C)
Brinar 450 [20]	4,0 - 80,0	410 - 490	1200	1500	8	25 (-20 °C)

Može se zaključiti da svojstva, a time i otpornost na abrazijski mehanizam trošenja čelika ovise o mikrostrukturi. Ne postoji samo jedna mikrostruktura otporna na abrazijski mehanizam trošenja, već prikladnost materijala s određenom mikrostrukturom ovisi o uvjetima u kojima se koristi [3].

U radu pod nazivom „Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steels“ autora Zdravecká E., Tkáčová J., Ondáč M. analiziran je utjecaj mikrostrukture na otpornost na abraziju odabranih niskolegiranih čelika visoke čvrstoće koji se koriste u industriji [24]. U svrhu ovog ispitivanja provedena je analiza mikrostrukture, mjerenje tvrdoće te ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ na sljedećim čelicima: Etalon 1.1013, S355JR, 700MC i Hardox 400 [24].

U radu je zaključeno da tvrdoća nije uvijek odlučujući čimbenik koji najviše utječe na otpornost na abrazijsko trošenje. Važan čimbenik otpornosti na abraziju je i mikrostruktura materijala te uvjeti eksploatacije. S obzirom da se u ovome radu ispituju čelici s obzirom na njihovu prikladnost za izradu poljoprivrednih alata, takvi čelici moraju imati i dovoljno veliku duktilnost. Krhka martenzitna mikrostruktura ne bi pokazala najbolju otpornost na abraziju u kombinaciji s dinamičkim udarnim opterećenjem, stoga se u ovome slučaju prednost daje feritnoj mikrostrukтури, odnosno čeliku S700MC [24].

Slika 12. prikazuje martenzitnu mikrostrukturu čelika Hardox 400 i feritnu mikrostrukturu čelika S700MC [24].



Slika 12. Mikrostruktura čelika Hardox 400 i mikrostruktura čelika S700MC [24]

Optimalna otpornost abrazijskom trošenju kod ovih čelika može se postići s nekoliko različitih mikrostruktura. S obzirom na to, mnogi čelici poboljšane otpornosti na abraziju imaju martenzitnu ili uglavnom martenzitnu mikrostrukturu. Razlog tome je to što je martenzit vrlo tvrda mikrostruktura s vrlo visokom vlačnom čvrstoćom [3].

Međutim, mikrostruktura čelika otpornog na trošenje može se sastojati ili uključivati nekoliko drugih faza. Na primjer, čelik može biti uglavnom ili djelomično bainitni te može sadržavati ferit, perlit ili zaostali austenit [3].

Ako se proučava mikrostruktura čelika poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja, dolazi se do zaključka da su manja zrna u korelaciji s boljom otpornošću na abraziju [3].

Otpornost materijala na abrazijski mehanizam trošenja u korelaciji je s granicom razvlačenja i s duktilnošću. Usitnjavanje zrna učinkovit je način povećanja granice razvlačenja bez narušavanja duktilnosti. Stoga se može zaključiti da usitnjavanje zrna dovodi do poboljšane otpornosti na abraziju. Brojna ispitivanja pokazala su da se smanjenjem veličine zrna otpornost na abraziju kontinuirano povećava [24], [25].

Čelik sa sitnijim kristalnim zrnima pokazuje bolju otpornost na abraziju od čelika s krupnijim zrnima. Tvrdoća čelika je prevladavajući čimbenik u određivanju otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja: sitnozrnati čelik (s većom tvrdoćom) pokazuje niži gubitak volumena i niži koeficijent trenja od relativno mekšeg čelika s krupnijim zrnima [26].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada

Osnovni cilj eksperimentalnoga dijela diplomskoga rada je odrediti otpornost na abrazijsko trošenje dvaju čelika poboljšane otpornosti na trošenje. Dobivene rezultate potrebno je usporediti i utvrditi koji od čelika ima bolju otpornost na abrazijsko trošenje.

U tu svrhu provedena su na oba čelika sljedeća ispitivanja:

- određivanje kemijskog sastava
- određivanje mikrostrukture
- mjerenje tvrdoće
- određivanje gustoće materijala
- ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“
- ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader.

5.2. Materijal za ispitivanje

Ispitivanje je provedeno na čelicima poboljšane otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja komercijalnih naziva Hardox 450 i XAR 450. Oba navedena čelika primjenjuju se za izradu podova i stranica sanduka kamiona kojima se prevozi rasuti teret s vrlo abrazivnim česticama.

Ispitni uzorci izrezani su iz ploča čelika Hardox 450 i čelika XAR 450, slika 13. i slika 14.

Debljina ploče čelika Hardox 450 iznosila je 5 mm, dok je debljina ploče čelika XAR 450 iznosila 4 mm.



Slika 13. Mjesto izrezivanja uzoraka čelika Hardox 450



Slika 14. Mjesto izrezivanja uzoraka čelika XAR 450

5.3. Provedena ispitivanja

5.3.1. Analiza kemijskog sastava

Određivanje kemijskog sastava provedeno je u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju GDS 850A, LECO, koji radi na principu optičke emisijske spektroskopije, slika 15. Prilikom analize kemijskog sastava, ispitni uzorak postavlja se u komoru uređaja, slika 16. Analiza kemijskog sastava provedena je tri puta za svaki ispitni uzorak te su izračunate srednje vrijednosti udjela pojedinih elemenata.

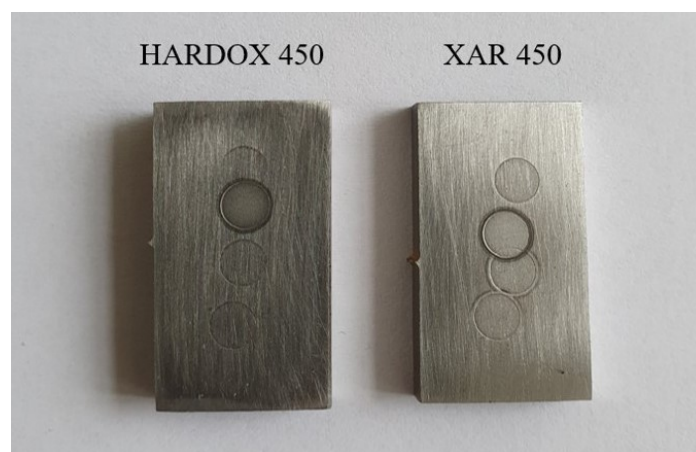
Površina uzoraka na kojoj se određuje kemijski sastav mora biti kvalitetno pripremljena, najbolje ispolirana. Slika 17. prikazuje površinu uzoraka s karakterističnim otiscima koji nastaju pri određivanju kemijskog sastava.



Slika 15. Uređaj za kemijsku analizu GDS 850A, LECO



Slika 16. Komora za kemijsku analizu uređaja GDS 850A, LECO



Slika 17. Uzorci čelika Hardox 450 i XAR 450 nakon kemijske analize

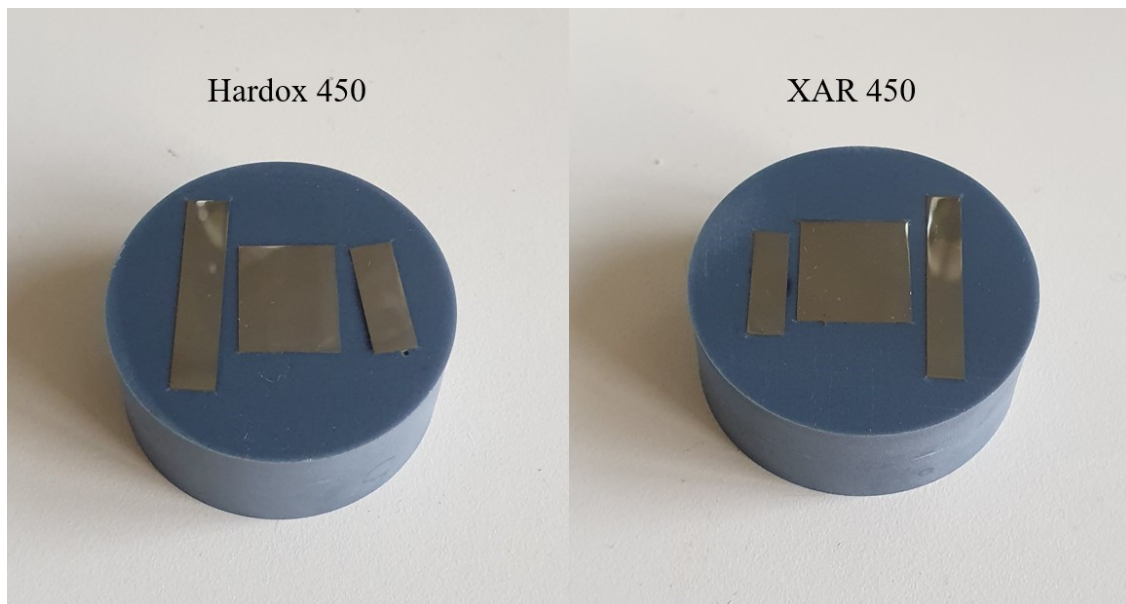
5.3.2. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture ispitnih materijala provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Kako se radi o valjanim pločama, na oba čelika analizirana je mikrostruktura u tri karakteristična presjeka:

- paralelno sa smjerom valjanja i okomito na površinu ploče
- poprečno na smjer valjanja i na površinu ploče
- paralelno s površinom ploče.

Ispitni uzorci su zaliveni u polimernu masu, a potom pripremljeni za daljnju metalografsku analizu, slika 18.

Mikrostruktura je analizirana na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 pri povećanjima od $50\times$ do $1000\times$, u poliranom i nagriženom stanju. Nagrizanje površine uzoraka provedeno je u 5 %-tnoj otopini dušične kiseline u etilnom alkoholu (Nital).



Slika 18. Zaliveni uzorci čelika Hardox 450 i čelika XAR 450

5.3.3. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju Instron, Wilson-Wolpert Tukon 2100B, slika 19.



Slika 19. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće Instron Wilson-Wolpert Tukon 2100B

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je na poliranoj površini uzoraka za svaki čelik, na sva tri karakteristična presjeka, slika 18. Na poprečnom i uzdužnom presjeku, mjerenje je obavljeno na rubovima i u sredini presjeka ploče.

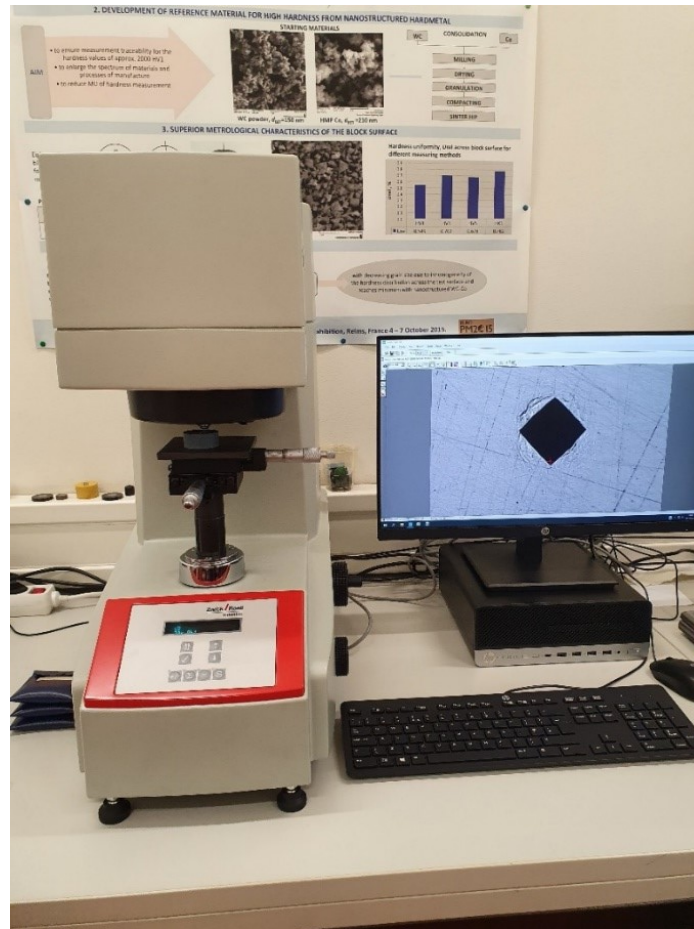
Mikrotvrdoća je izmjerena Vickersovom metodom pri opterećenjima od 1,961 N (HV0,2) i 9,807 N (HV1).

Mjerenje mikrotvrdoće na svakoj površini ponovljeno je tri puta te su izračunate srednje vrijednosti.

Mjerenje makrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na uređaju Zwick/Roell ZHV μ , slika 20.

Tvrdoća je izmjerena Vickersovom metodom pri opterećenju od 19,61 N (HV2).

Na svakom karakterističnom presjeku mjerenje je ponovljeno pet puta.



Slika 20. Uređaj za mjerenje tvrdoće Zwick/Roell ZHVµ

5.3.4. Određivanje gustoće

Određivanje gustoće čelika provedeno je u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na laboratorijskoj analitičkoj vagi Mettler Toledo, slika 21. Gustoća se određuje prema Arhimedovu principu koji se temelji na mjerenju mase ispitnih uzoraka na zraku, a zatim u mediju poznate temperature.

Uzorci za ispitivanje prethodno su ručno pobrušeni kako bi se uklonile nečistoće i korozijski produkti s površine, slika 22. Kao medij korištena je destilirana voda temperature 25 °C.



Slika 21. Laboratorijska vaga za mjerenje gustoće Mettler Toledo



Slika 22. Uzorci za određivanje gustoće

5.3.5. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na dva načina:

- standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“
- ispitivanjem na uređaju Taber abrader.

5.3.5.1. Standardna metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ - ASTM G65-94

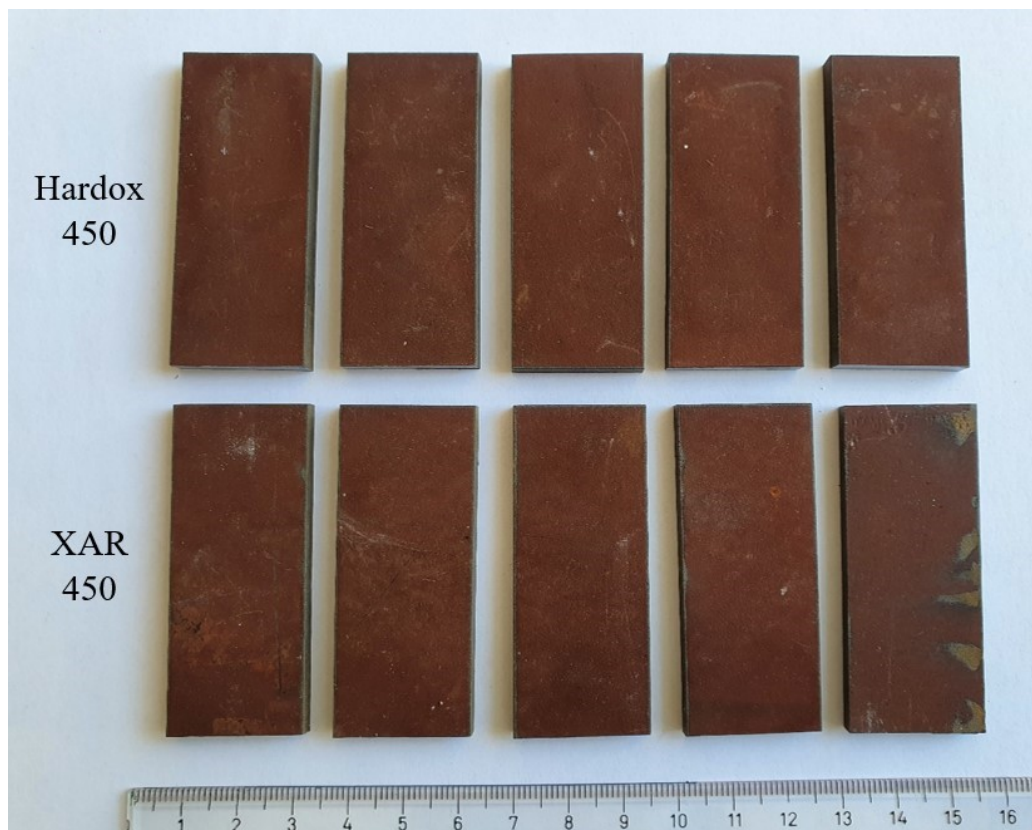
Za provođenje ispitivanja otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja standardnom ispitnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“, preporučene dimenzije epruvete, odnosno ispitnog uzorka su $12 \times 25 \times 75$ mm [4].

S obzirom na debljine čeličnih ploča (4 i 5 mm), izrezani su ispitni uzorci $5 \times 25 \times 60$ mm za čelik Hardox 450 te $4 \times 25 \times 60$ mm za čelik XAR 450, slika 23. Za svaki čelik pripremljeno je po pet ispitnih uzoraka.

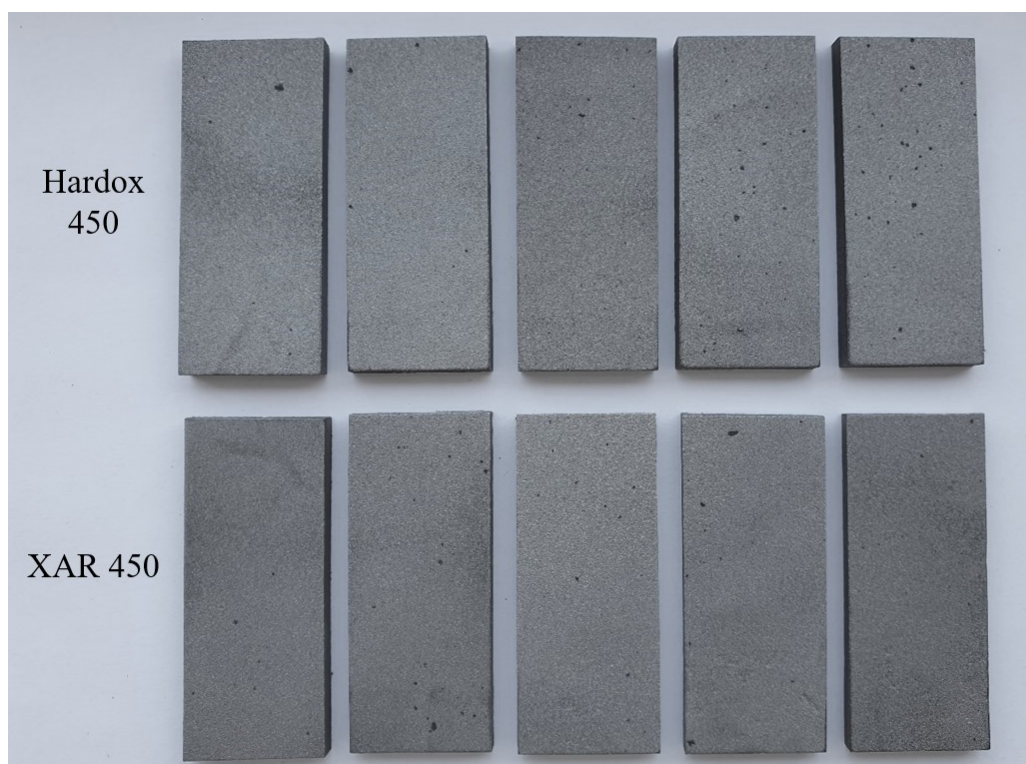
Prije ispitivanja otpornosti na trošenje, zbog korodiranog sloja na površinama uzoraka, uzorci su podvrgnuti pjeskarenju. Nakon pjeskarenja dobivene su površine bez nečistoća i produkata korozijskih procesa, slika 24.

Kako bi uvjeti norme ASTM G65-94 za provođenje ispitivanja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ bili ispunjeni, odnosno kako bi dimenzije ispitnih uzoraka bile u skladu s normom, izrađeni su držači za uzorke, slika 25. Držači za uzorke napravljeni su tako da sadrže utor u koji se postavlja uzorak kako bi se dobile odgovarajuće dimenzije za provođenje ispitivanja. Slika 26. prikazuje položaj ispitnog uzorka u držaču.

Držači za uzorke izrađeni su 3D printanjem u Laboratoriju za preradbu polimera i drva Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



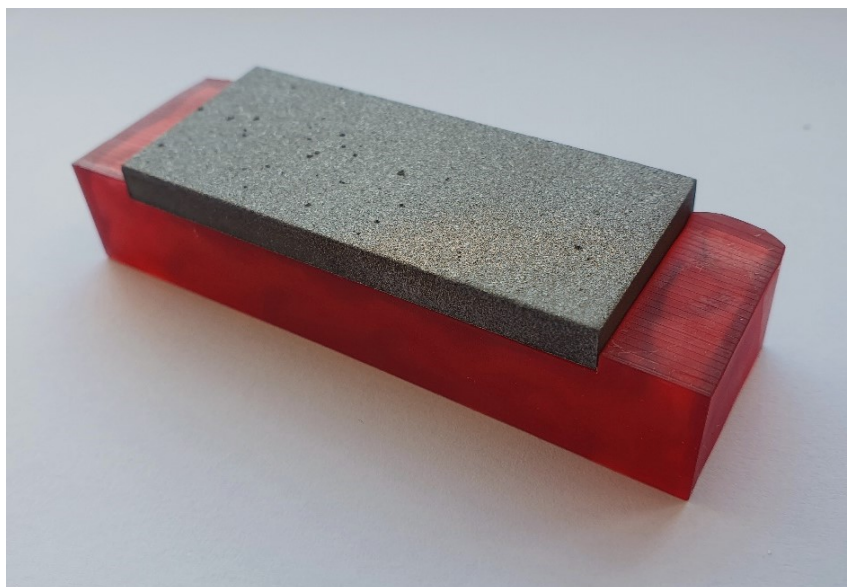
Slika 23. Uzorci za ispitivanje otpornosti na abraziju metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“



Slika 24. Ispjeskareni uzorci čelika Hardox 450 i XAR 450



Slika 25. Držači za uzorke



Slika 26. Položaj ispitnog uzorka u držaču

Slika 27. prikazuje uređaj za ispitivanje navedenom metodom.



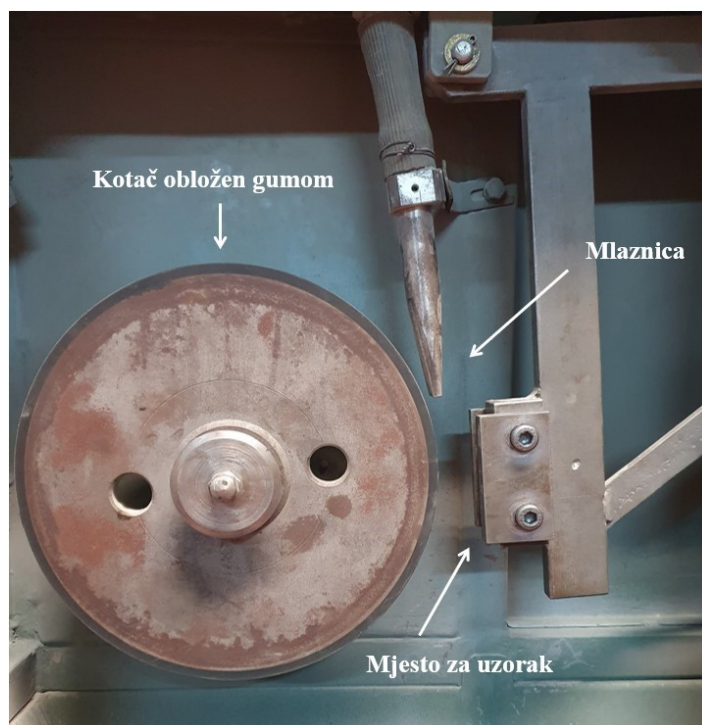
Slika 27. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Nakon što se uzorak postavi na odgovarajuće mjesto na uređaju, pokreće se protok pijeska i kotač obloženog gumom, a uzorak se preko sustava poluga dovodi u kontakt s rotirajućim kotačem. Slika 28. prikazuje važnije dijelove uređaja, a slika 29. prikazuje proces samog ispitivanja.

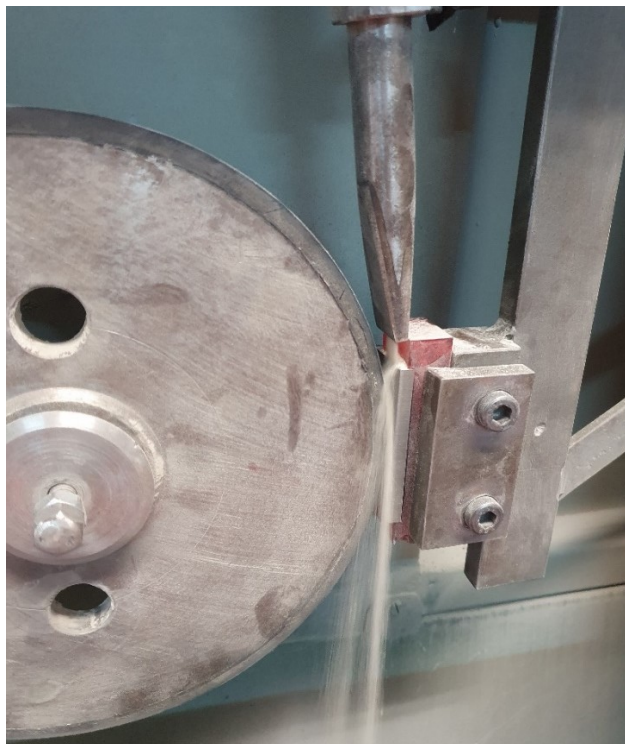
Ispitivanje je provedeno prema varijanti B norme ASTM G65-94 koja propisuje silu kojom uzorak pritišće na kotač (130 N) i ukupni broj okretaja kotača (2000), odnosno abradiranu duljinu od 1436 m.

Ispitivanje je provedeno na pet uzoraka od svake vrste čelika s obje strane uzorka te je ukupno dobiveno deset rezultata za svaku vrstu čelika.

Uzorcima je izmjerena masa prije i nakon provođenja ispitivanja kako bi se mogao odrediti gubitak mase. S obzirom da se radi o uzorcima različite gustoće, gubitak mase nužno je preračunati u gubitak volumena, sukladno propisima norme ASTM G65-94.

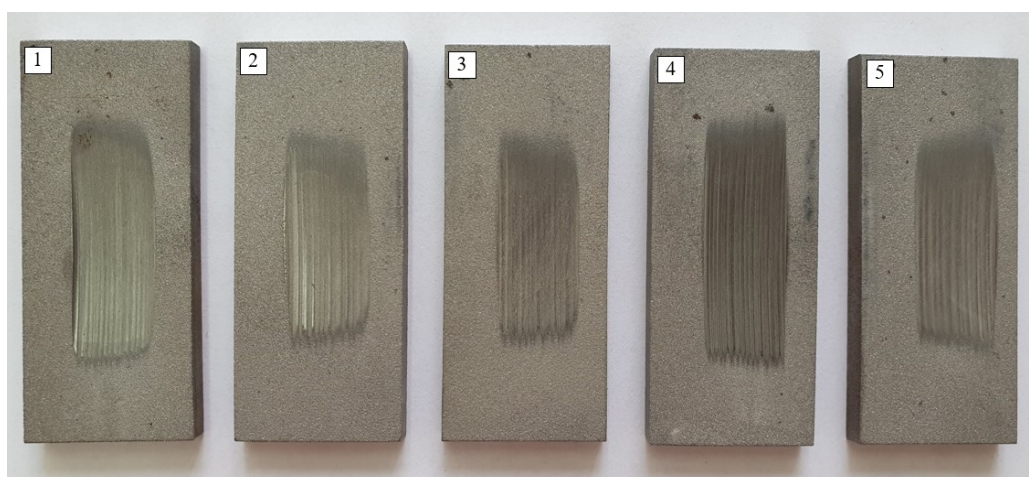


Slika 28. Važniji dijelovi uređaja za ispitivanje abrazijskog trošenja

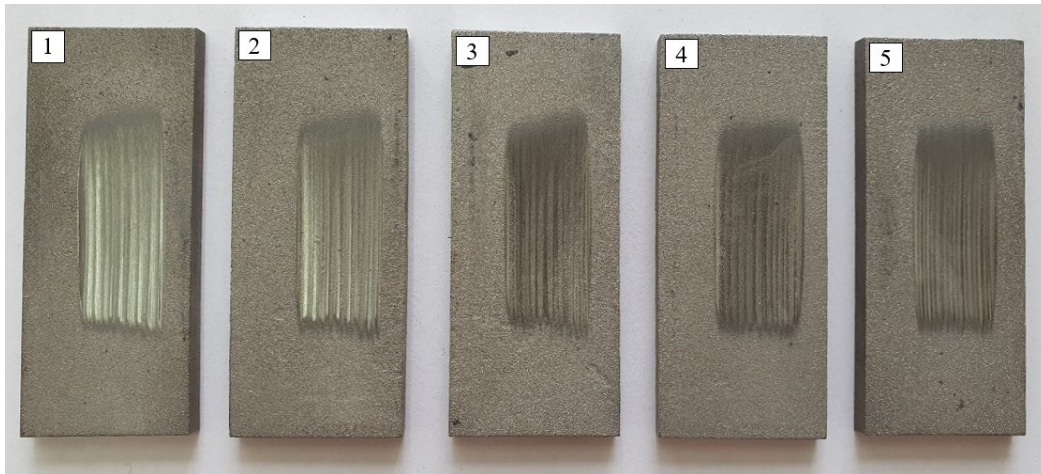


Slika 29. Ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Slika 30. i slika 31. prikazuju abradiranu površinu ispitnih uzoraka obaju čelika nakon provedenog ispitivanja.



Slika 30. Abradirana površina uzoraka čelika Hardox 450 nakon ispitivanja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

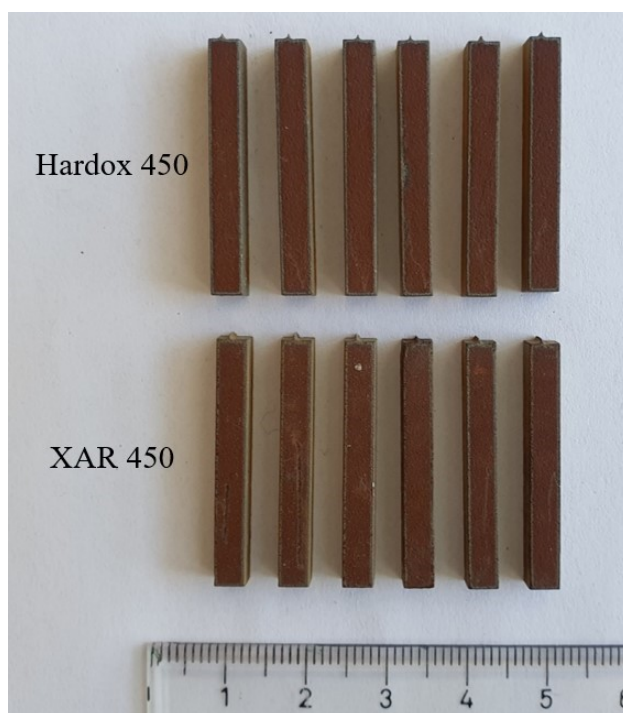


Slika 31. Abradirana površina uzoraka čelika XAR 450 nakon ispitivanja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

5.3.5.2. Taber abrader

Ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja na uređaju Taber abrader provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Dimenzije ispitnih uzoraka čelika Hardox 450 bile su $4 \times 5 \times 30$ mm, dok su ispitni uzorci čelika XAR 450 imali dimenzije $4 \times 4 \times 30$ mm, slika 32.



Slika 32. Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader prije brušenja površine

Prije ispitivanja, uzorci su ručno pobrušeni kako bi se uklonile nečistoće i korodirani sloj s površine, slika 33.

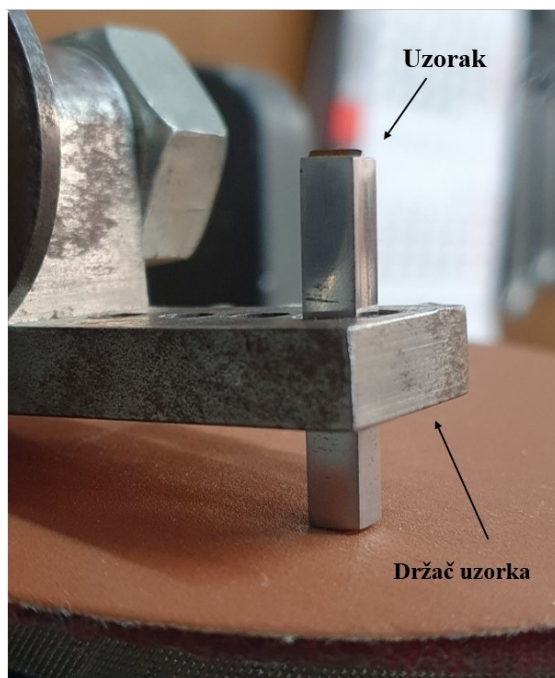
Ispitivanje otpornosti na abrazijski mehanizam trošenja provedeno je na uređaju Taber abrader, slika 34. Uređaj se sastoji od rotirajućeg diska na koji se postavlja brusni papir određene kvalitete. Rotirajući disk rotira brzinom od 60 okretaja u minuti, a ispitni uzorak postavlja se okomito na disk na koji je pritisnut silom od 4,91 N, slika 35.



Slika 33. Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader nakon brušenja površine



Slika 34. Uređaj Taber abrader



Slika 35. Položaj uzorka u odnosu na abrazivni papir prilikom ispitivanja na uređaju Taber abrader

Ispitano je po pet uzoraka obje vrste čelika, na osam različitih kvaliteta brusnih papira. Materijal abrazivnih čestica brusnih papira je aluminijev oksid (Al_2O_3).

Tablica 4. prikazuje oznake korištenih brusnih papira prema ISO/FEPA standardima, s vrijednostima srednje veličine abrazivnih čestica.

Tablica 4. Oznake brusnih papira prema ISO/FEPA standardu

Oznaka brusnog papira prema ISO/FEPA standardu	Srednja veličina abrazivnih čestica, μm
P180	82
P240	58,5
P280	52,2
P320	46,2
P400	35,0
P500	30,2
P800	21,8
P1200	15,3

Pri ispitivanju se veličina abrazivnih čestica brusnih papira postupno povećavala, a slijed oznaka kretao se od P1200 do P180. Na svakom brusnom papiru, pojedini uzorci podvrgnuti su abradiranju rotiranjem diska od ukupno 100 okretaja, što bi odgovaralo ukupnoj abradiranoj duljini od 26 metara.

Masa uzoraka izmjerena je prije i nakon ispitivanja kako bi se odredio gubitak mase pri abraziji. Kako uzorci imaju različitu gustoću, da bi se rezultati mogli uspoređivati, gubitak mase je preračunat u gubitak volumena.

5.4. Rezultati ispitivanja

5.4.1. Rezultati analize kemijskog sastava

Tablica 5. prikazuje rezultate analize kemijskog sastava za čelik Hardox 450, a tablica 6. prikazuje rezultate analize kemijskog sastava za čelik XAR 450.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika Hardox 450

Mjerenje	maseni udio, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
1	0,17	0,28	1,02	0,0115	0,0021	0,06	0,07	0,04	ostatak
2	0,13	0,31	1,07	0,0129	0,0023	0,06	0,07	0,04	ostatak
3	0,11	0,29	1,06	0,0153	0,0009	0,06	0,07	0,04	ostatak
\bar{x}	0,14	0,29	1,05	0,0132	0,0018	0,06	0,07	0,04	ostatak

Tablica 6. Kemijski sastav čelika XAR 450

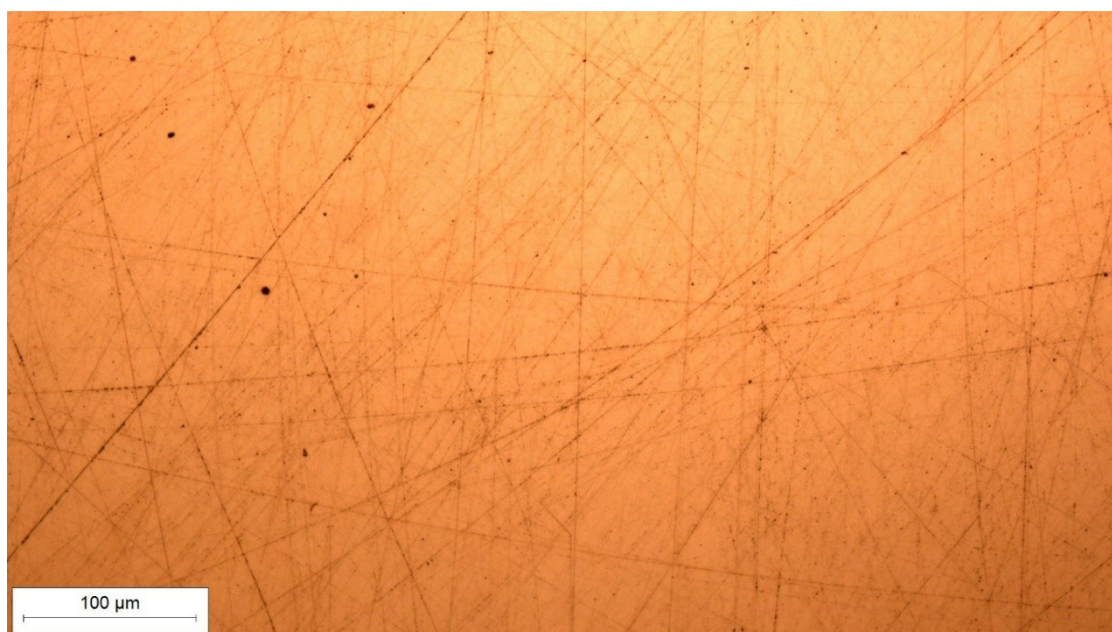
Mjerenje	maseni udio, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
1	0,08	0,27	1,00	0,0205	0,0015	0,29	0,04	0,02	ostatak
2	0,08	0,27	1,00	0,0235	0,0009	0,30	0,04	0,02	ostatak
3	0,08	0,25	0,97	0,0171	0,0009	0,29	0,04	0,02	ostatak
\bar{x}	0,08	0,26	0,99	0,0204	0,0011	0,29	0,04	0,02	ostatak

5.4.2. Rezultati analize mikrostrukture

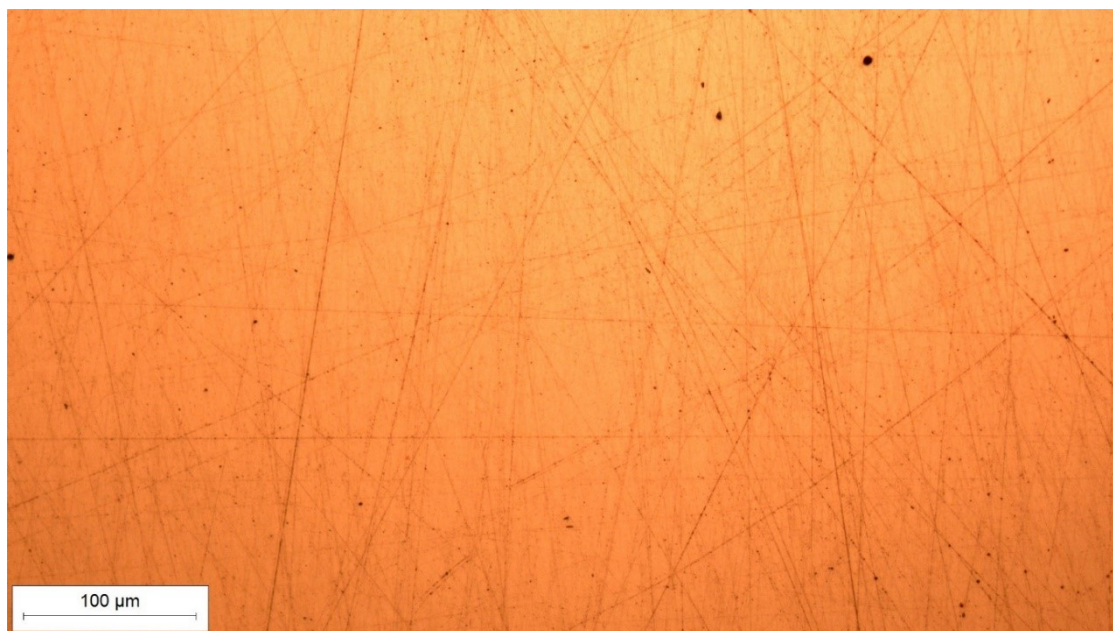
5.4.2.1. Analiza mikrostrukture u poliranom stanju

Slika 36. prikazuje mikrostrukturu uzorka čelika Hardox 450 u poliranom stanju, dok slika 37. prikazuje mikrostrukturu čelika XAR 450 u poliranom stanju.

U poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti u mikrostrukтури. Ravne tanke crte koje se vide na površini obaju uzoraka su tragovi zaostali nakon završnog poliranja.



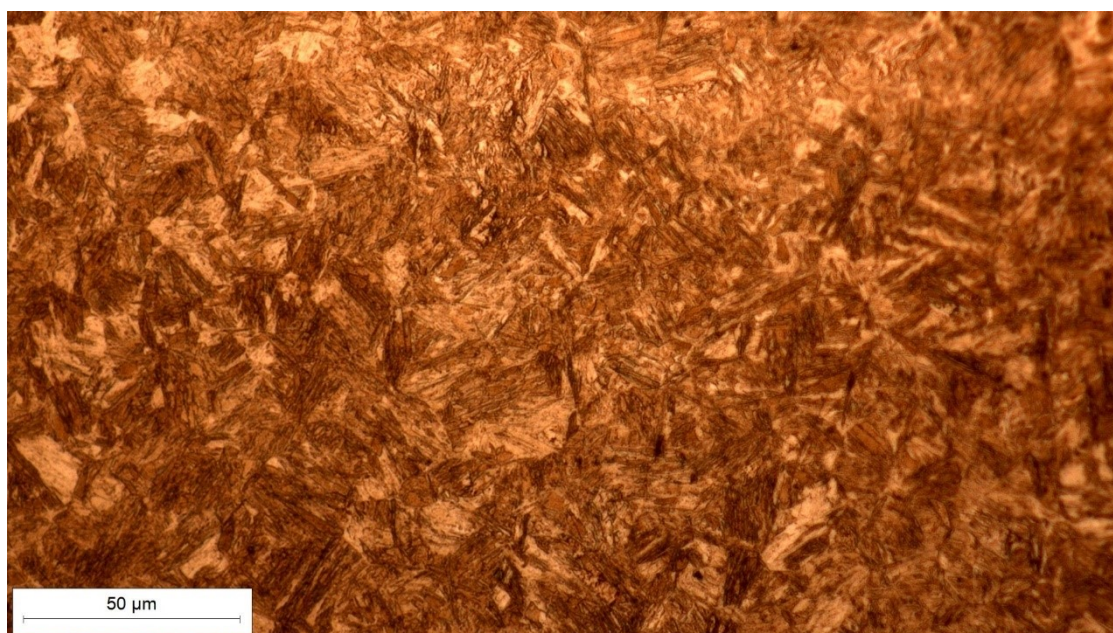
Slika 36. Mikrostruktura čelika Hardox 450 u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 200×



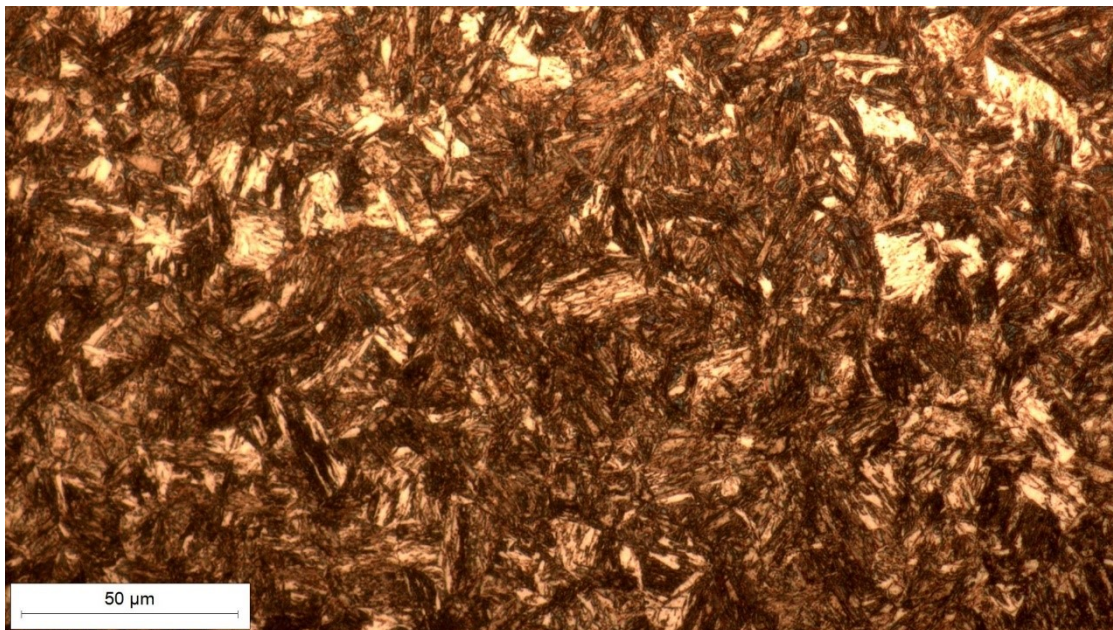
Slika 37. Mikrostruktura čelika XAR 450 u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 200×

5.4.2.2. *Analiza mikrostrukture u nagriženom stanju*

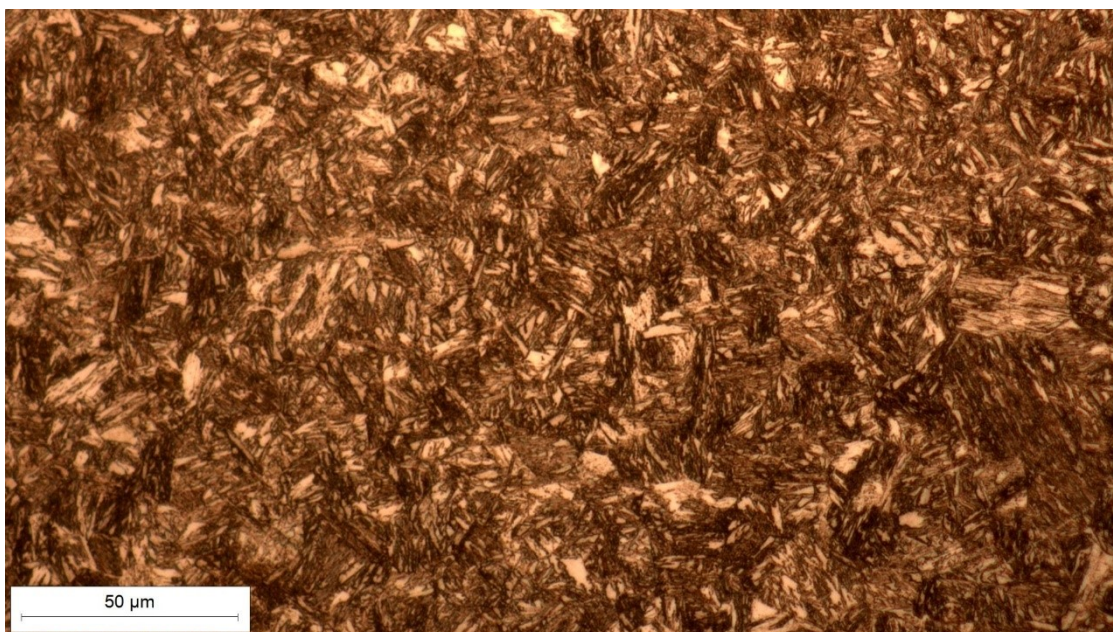
Mikrostruktura ispitivanih čelika u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×, prikazana je na fotografijama koje slijede, slika 38. do slika 43.



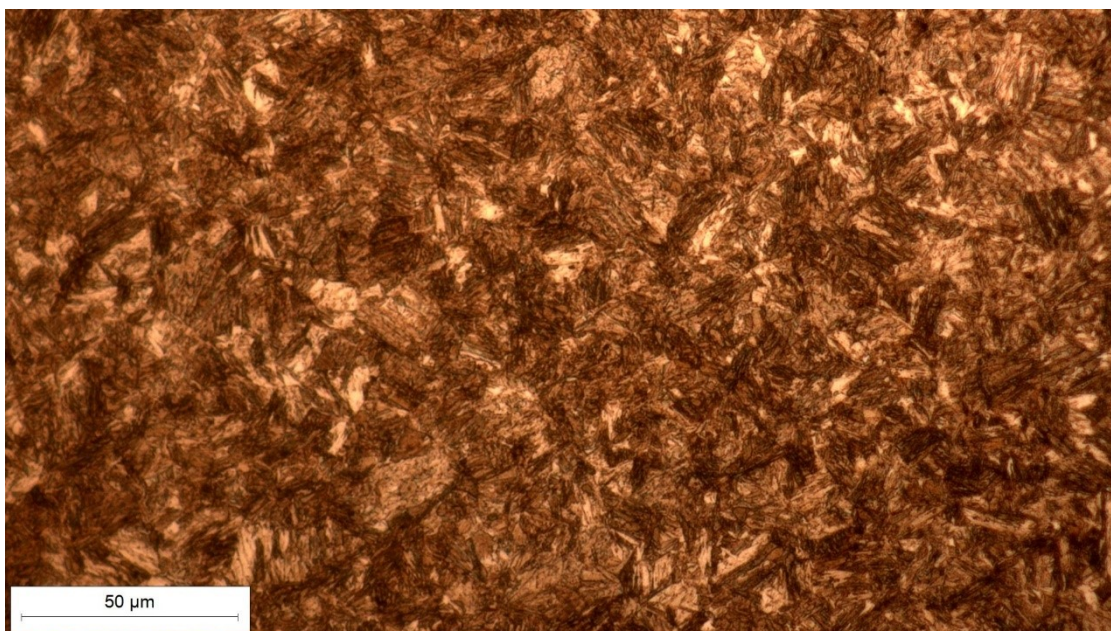
Slika 38. Mikrostruktura uzdužnog presjeka čelika Hardox 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×



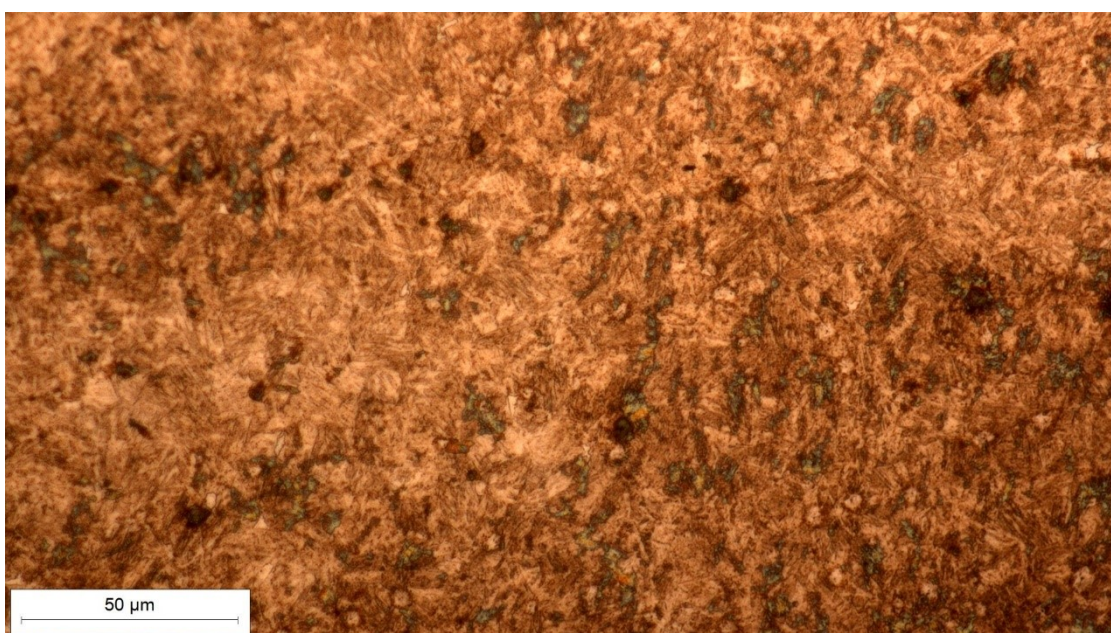
Slika 39. Mikrostruktura poprečnog presjeka čelika Hardox 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×



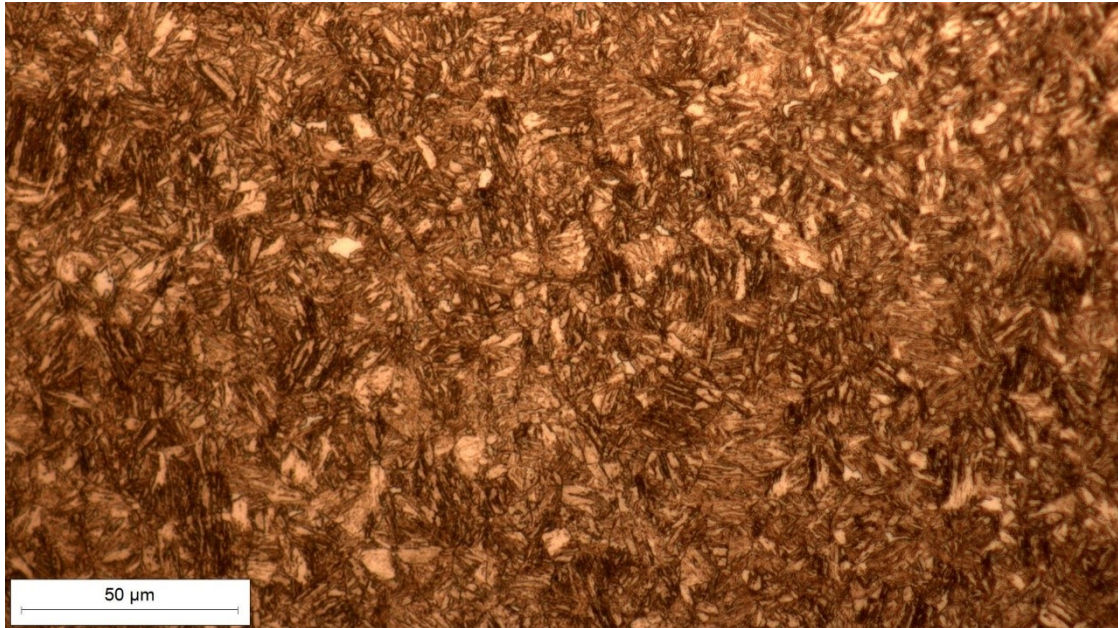
Slika 40. Mikrostruktura presjeka paralelnog s površinom čelika Hardox 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×



Slika 41. Mikrostruktura uzdužnog presjeka čelika XAR 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×



Slika 42. Mikrostruktura poprečnog presjeka čelika XAR 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×



Slika 43. Mikrostruktura presjeka paralelnog s površinom čelika XAR 450 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 500×

5.4.3. Rezultati mjerenje tvrdoće

5.4.3.1. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 na karakterističnim presjecima prikazani su u tablicama koje slijede, tablica 7. i tablica 8.

Tablica 7. Izmjerena mikrotvrdoća HV0,2 za čelik Hardox 450

Hardox 450		1	2	3	\bar{x}	\bar{X}
poprečni presjek	1. rub	482	459	498	480	485
	sredina	506	490	482	493	
	2. rub	482	506	459	482	
paralelno s površinom	sredina	474	490	498	487	487
uzdužni presjek	1. rub	432	445	459	445	468
	sredina	490	498	482	490	
	2. rub	490	459	459	469	

Tablica 8. Izmjerena mikrotvrdoća HV0,2 za čelik XAR 450

XAR 450		1	2	3	\bar{x}	\bar{X}
poprečni presjek	1. rub	459	490	474	474	482
	sredina	474	459	490	474	
	2. rub	490	490	515	498	
paralelno s površinom	sredina	445	467	452	455	455
uzdužni presjek	1. rub	452	506	490	483	491
	sredina	490	515	490	498	
	2. rub	482	482	515	493	

5.4.3.2. Rezultati mjerenja tvrdoće HV1

Rezultati mjerenja tvrdoće HV1 za čelik Hardox 450 i čelik XAR prikazani su u tablicama koje slijede, tablica 9. i tablica 10.

Tablica 9. Izmjerena tvrdoća HV1 za čelik Hardox 450

Hardox 450		1	2	3	\bar{x}	\bar{X}
poprečni presjek	1. rub	458	492	452	467	471
	sredina	478	500	492	490	
	2. rub	445	458	465	456	
paralelno s površinom	sredina	485	471	492	483	483
uzdužni presjek	1. rub	458	478	478	471	463
	sredina	478	458	471	469	
	2. rub	452	458	439	450	

Tablica 10. Izmjerena tvrdoća HV1 za čelik XAR 450

XAR 450		1	2	3	\bar{x}	\bar{X}
poprečni presjek	1. rub	497	486	505	496	499
	sredina	485	500	500	495	
	2. rub	515	500	507	507	
paralelno s površinom	sredina	507	500	515	507	507
uzdužni presjek	1. rub	500	507	492	500	498
	sredina	492	507	507	502	
	2. rub	500	492	485	492	

5.4.3.3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV2

Rezultati mjerenja tvrdoće HV2, za oba ispitivana čelika, prikazani su u tablicama koje slijede, tablica 11. i tablica 12.

Tablica 11. Izmjerena tvrdoća HV2 za čelik Hardox 450

Hardox 450	1	2	3	4	5	\bar{x}
poprečni presjek	458	449	454	449	455	453
paralelno s površinom	460	458	459	472	446	459
uzdužni presjek	447	446	443	445	451	446

Tablica 12. Izmjerena tvrdoća HV2 za čelik XAR 450

XAR 450	1	2	3	4	5	\bar{x}
poprečni presjek	447	454	451	446	449	449
paralelno s površinom	480	436	436	448	440	448
uzdužni presjek	447	449	451	452	446	449

5.4.4. Rezultati određivanja gustoće

Tablica 13. prikazuje rezultate određivanja gustoće za oba ispitivana uzorka.

Tablica 13. Rezultati određivanja gustoće

	Gustoća ρ, g/cm³
Hardox 450	7,648
XAR 450	7,588

5.4.5. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje

5.4.5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Tablica 14. prikazuje gubitak mase oba analizirana čelika pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“. Da bi se rezultati mogli uspoređivati, gubitak mase preračunat je u gubitak volumena, tablica 15.

Tablica 14. Gubitak mase obaju ispitivanih čelika pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Uzorak	Gubitak mase pri abraziji Δm , g	
	Hardox 450	XAR 450
1	0,7728	1,6555
2	1,1608	1,5091
3	1,2169	1,5045
4	1,5655	1,3733
5	1,6340	1,2642
6	1,3735	1,4571
7	1,2493	1,4773
8	1,4444	1,4227
9	0,9317	1,0347
10	1,3577	0,9966
srednja vrijednost	1,2707	1,3695
standardna devijacija	0,2541	0,2010
koeficijent varijacije	20,0 %	14,7 %

Tablica 15. Gubitak volumena obaju ispitivanih čelika pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Uzorak	Gubitak volumena pri abraziji ΔV , mm ³	
	Hardox 450	XAR 450
1	101,05	218,17
2	151,78	198,88
3	159,11	198,27
4	204,69	180,98
5	213,65	166,61
6	179,59	192,03
7	163,35	194,69
8	188,86	187,49
9	121,82	136,36
10	177,52	131,34
srednja vrijednost	166,14	180,48
standardna devijacija	33,22	26,49
koeficijent varijacije	20,0 %	14,7 %

5.4.5.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader

Gubici mase uzoraka čelika Hardox 450 i čelika XAR 450 pri ispitivanju abrazijskog trošenja na uređaju Taber abrader prikazani su u tablicama koje slijede, tablica 16. i tablica 17.

Kako bi se rezultati mogli međusobno uspoređivati, gubitak mase za oba ispitivana čelika preračunat je u gubitak volumena, tablica 18. i tablica 19.

U tablicama su prikazani svi rezultati i srednje vrijednosti na svakom od korištenih brusnih papira.

Tablica 16. Gubitak mase čelika Hardox 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader

Hardox 450	Gubitak mase pri abraziji Δm , g					
	1	2	3	4	5	\bar{x}
P1200	0,0019	0,0014	0,0016	0,0014	0,0017	0,0016
P800	0,0064	0,0071	0,0068	0,0074	0,0062	0,0068
P500	0,0080	0,0086	0,0081	0,0084	0,0094	0,0085
P400	0,0090	0,0085	0,0079	0,0089	0,0083	0,0085
P320	0,0087	0,0098	0,0100	0,0081	0,0093	0,0092
P280	0,0116	0,0081	0,0117	0,0124	0,0114	0,0110
P240	0,0104	0,0114	0,0111	0,0121	0,0104	0,0111
P180	0,0131	0,0136	0,0128	0,0131	0,0143	0,0134

Tablica 17. Gubitak mase čelika XAR 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader

XAR 450	Gubitak mase pri abraziji Δm , g					
	1	2	3	4	5	\bar{x}
P1200	0,0017	0,0017	0,0005	0,0018	0,0018	0,0015
P800	0,0060	0,0068	0,0062	0,0068	0,0064	0,0064
P500	0,0089	0,0076	0,0081	0,0090	0,0088	0,0085
P400	0,0086	0,0077	0,0078	0,0115	0,0086	0,0088
P320	0,0086	0,0095	0,0090	0,0086	0,0084	0,0088
P280	0,0119	0,0113	0,0119	0,0112	0,0114	0,0115
P240	0,0121	0,0118	0,0116	0,0117	0,0119	0,0118
P180	0,0141	0,0124	0,0128	0,0135	0,0138	0,0133

Tablica 18. Gubitak volumena čelika Hardox 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader

Hardox 450	Gubitak volumena pri abraziji ΔV , mm ³					
	1	2	3	4	5	\bar{x}
P1200	0,2484	0,1831	0,2092	0,1831	0,2223	0,2092
P800	0,8368	0,9283	0,8891	0,9676	0,8107	0,8865
P500	1,0460	1,1245	1,0591	1,0983	1,2291	1,1114
P400	1,1768	1,1114	1,0329	1,1637	1,0853	1,1140
P320	1,1376	1,2814	1,3075	1,0591	1,2160	1,2003
P280	1,5167	1,0643	1,5298	1,6213	1,4906	1,4446
P240	1,3598	1,4906	1,4514	1,5821	1,3598	1,4487
P180	1,7129	1,7782	1,6736	1,7129	1,8698	1,7495

Tablica 19. Gubitak volumena čelika XAR 450 pri ispitivanju na uređaju Taber abrader

XAR 450	Gubitak volumena pri abraziji ΔV , mm ³					
	1	2	3	4	5	\bar{x}
P1200	0,2240	0,2240	0,0659	0,2372	0,2372	0,1977
P800	0,7907	0,8962	0,8171	0,8962	0,8434	0,8487
P500	1,1729	1,0016	1,0675	1,1861	1,1597	1,1176
P400	1,1334	1,0148	1,0279	1,5156	1,1334	1,1650
P320	1,1334	1,2520	1,1861	1,1334	1,1070	1,1624
P280	1,5683	1,4892	1,5683	1,4760	1,5024	1,5208
P240	1,5946	1,5551	1,5287	1,5419	1,5683	1,5577
P180	1,8582	1,6342	1,6869	1,7791	1,8187	1,7554

5.5. Analiza rezultata

5.5.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava pokazuje da su čelici Hardox 450 i XAR 450 niskougljični čelici. Čelik Hardox 450 sadrži oko 0,14 % ugljika, dok čelik XAR 450 ima znatno manji udio ugljika, oko 0,08 %. Oba čelika sadrže podjednaku količinu silicija i mangana. Udio nečistoća (sumpora i fosfora) je vrlo nizak i oba čelika pripadaju skupini plemenitih čelika ($< 0,035 \%S$ i P). Oba ispitivana čelika sadrže i male količine kroma, nikla i molibdena, ali njihov maseni udio ne prelazi granični udio elemenata koji odjeljuje nelegirane od legiranih čelika (norma EN 10020) [22].

5.5.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

Analizom mikrostrukture u nagriženom stanju otkrivena je kod oba čelika homogena, sitnozrnata, finoigličasta, martenzitna mikrostruktura. Veličina zrna je podjednaka kod oba čelika. Kod ovih čelika u mikrostrukтури mogu biti prisutni i vrlo fini, koherentni karbidi. Njihova veličina je ispod granice razlučivosti svjetlosnog mikroskopa pa se na ovim fotografijama ne vide.

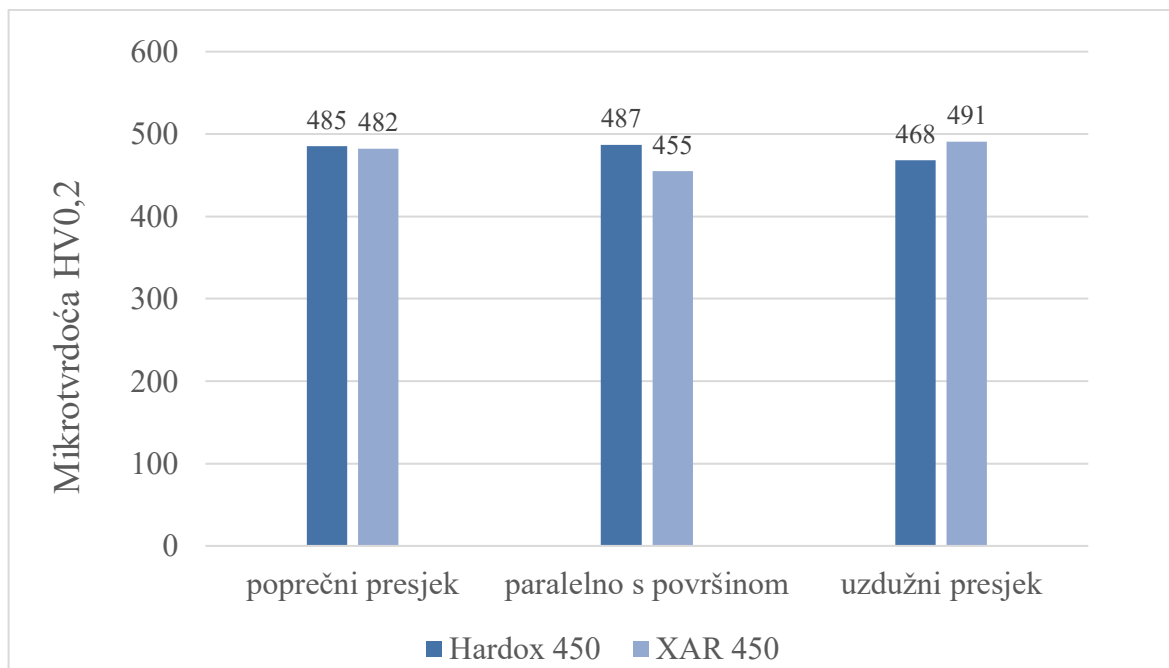
5.5.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće

Analiza rezultata mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 pokazuje da u poprečnom presjeku nema razlike između tvrdoće uspoređivanih čelika. U uzdužnom presjeku, čelik XAR 450 ima više vrijednosti tvrdoće, a u presjeku paralelnom s površinom ploče nešto više vrijednosti tvrdoće ima čelik Hardox 450, slika 44. Kod čelika Hardox 450 izmjerene su više tvrdoće u sredini nego na rubu poprečnog presjeka ploče, dok kod čelika XAR 450 navedeno nije uočeno. Relativno velika rasipanja rezultata prisutna su kod oba uzorka. Dobivene vrijednosti tvrdoće nalaze se u rasponu tvrdoća koje se mogu očekivati s obzirom na mikrostrukturu analiziranih čelika.

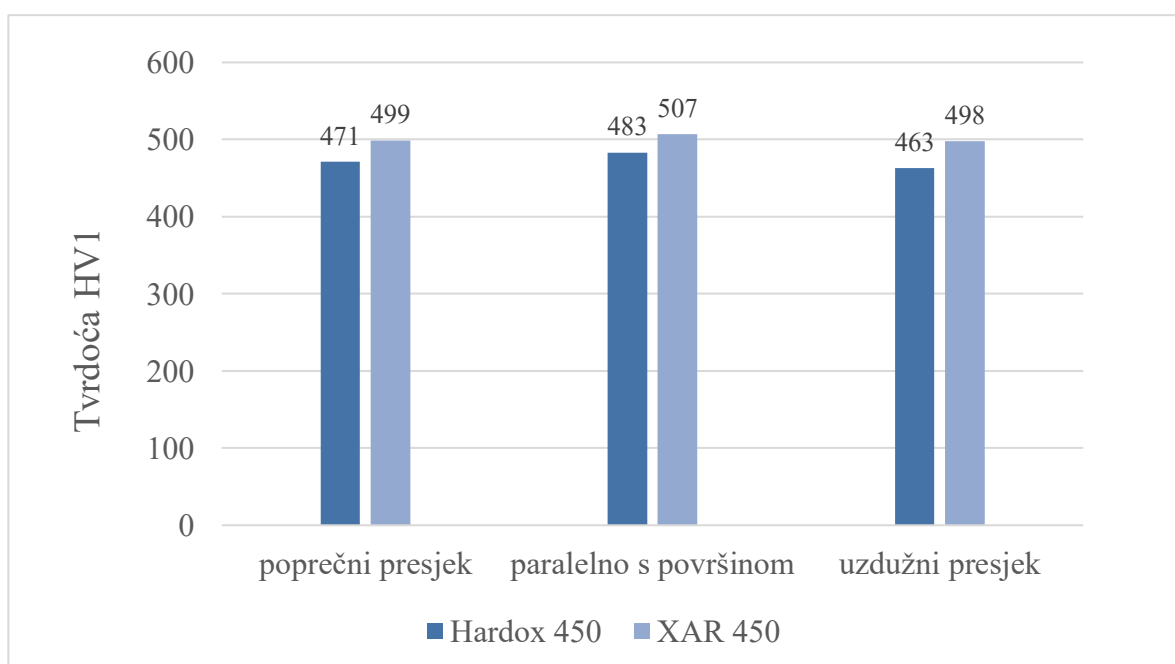
Rezultati mjerenja tvrdoće HV1 pokazuju nešto višu tvrdoću čelika XAR 450 koja je u rasponu od 498 HV1 do 507 HV1. Tvrdoća čelika Hardox 450 je u rasponu od 463 HV1 do 483 HV1, slika 45.

Rezultati mjerenja tvrdoće HV2 pokazuju vrlo ujednačenu tvrdoću analiziranih čelika. Vrijednosti tvrdoće obaju čelika u svim presjecima su u rasponu od 446 HV2 do 459 HV2, slika 46.

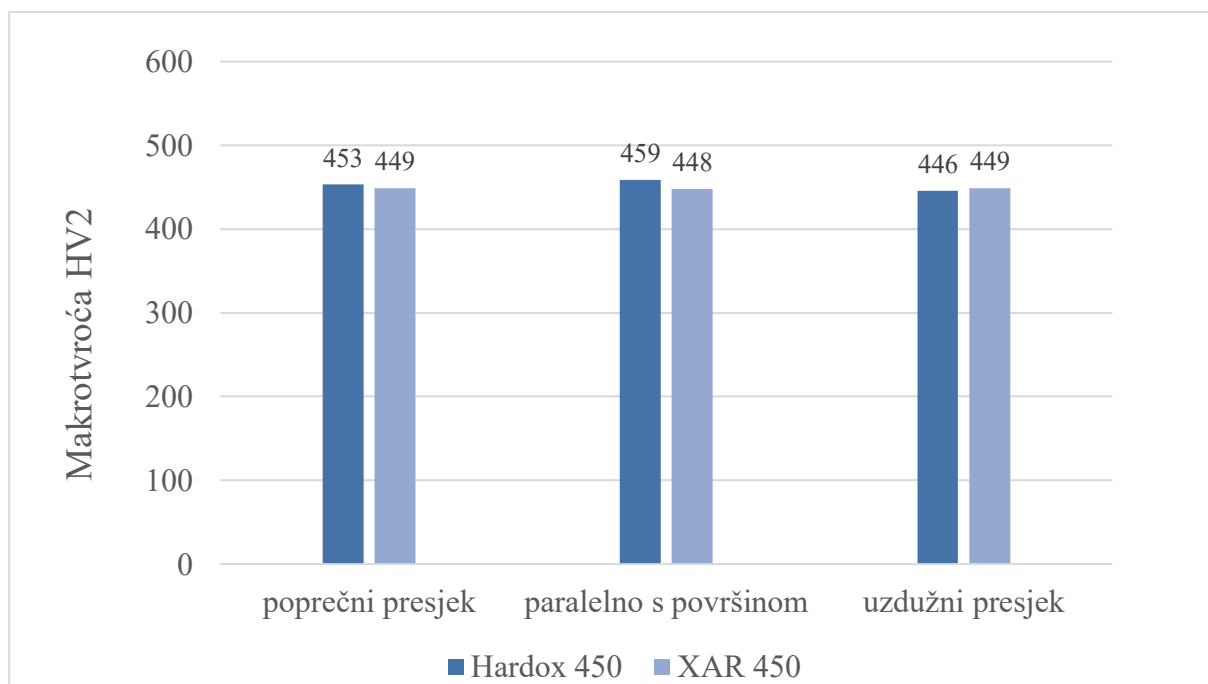
Izmjerene vrijednosti za tvrdoću HV2 niže su od izmjerenih vrijednosti za tvrdoću HV0,2 i HV1.



Slika 44. Usporedba rezultata mjerenja mikrotvrdoće HV0,2



Slika 45. Usporedba rezultata mjerenja tvrdoće HV1



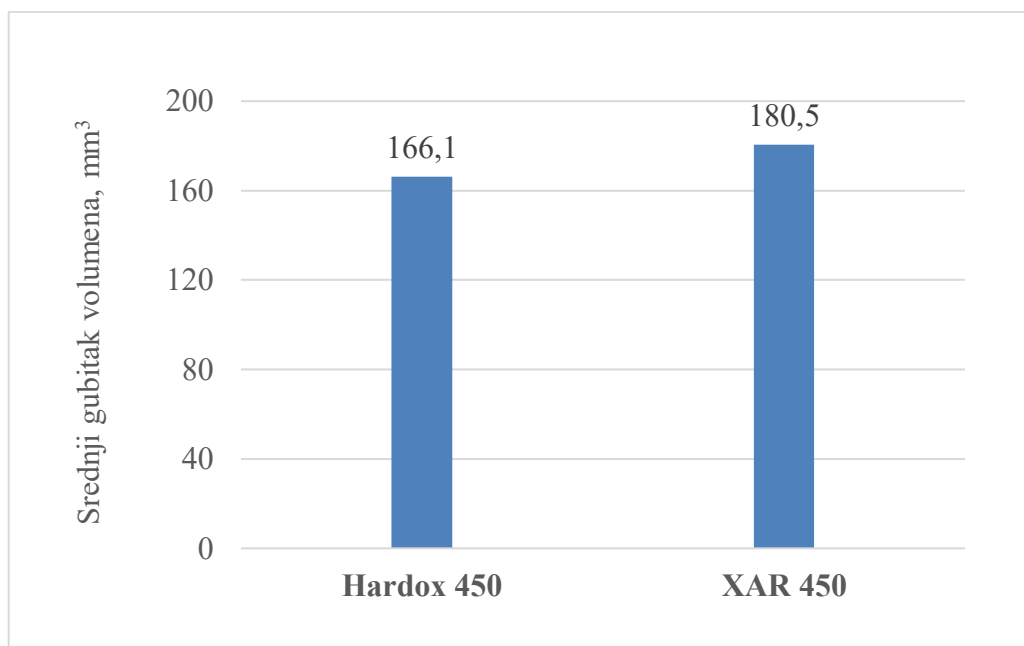
Slika 46. Usporedba rezultata mjerenja makrotvrdoće HV2

5.5.4. Osvrt na rezultate mjerenja otpornosti na trošenje

5.5.4.1. Osvrt na rezultate mjerenja otpornosti na trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

Prosječan gubitak volumena čelika Hardox 450 pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ iznosi $166,14 \text{ mm}^3$ i niži je za oko 8 % od prosječnog gubitka volumena čelika XAR 450 koji je $180,48 \text{ mm}^3$, slika 47. To znači da je njegova otpornost na abraziju, ispitana ovom metodom, malo bolja.

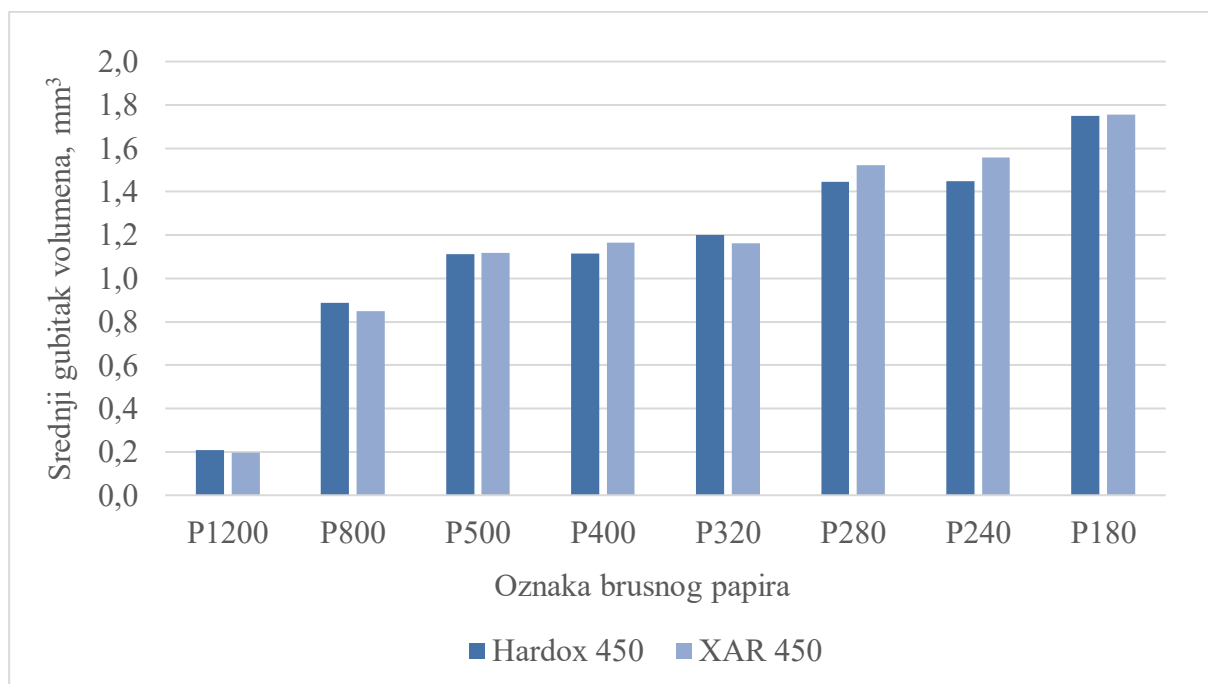
Također, važno je napomenuti da su rasipanja rezultata za čelik Hardox 450 puno veća u odnosu na čelik XAR 450, odnosno standardna devijacija gubitka volumena za čelik Hardox 450 iznosi 33,22, dok za čelik XAR 450 iznosi 26,49. Koeficijent varijacije za čelik Hardox 450 veći je od koeficijenta varijacije čelika XAR.



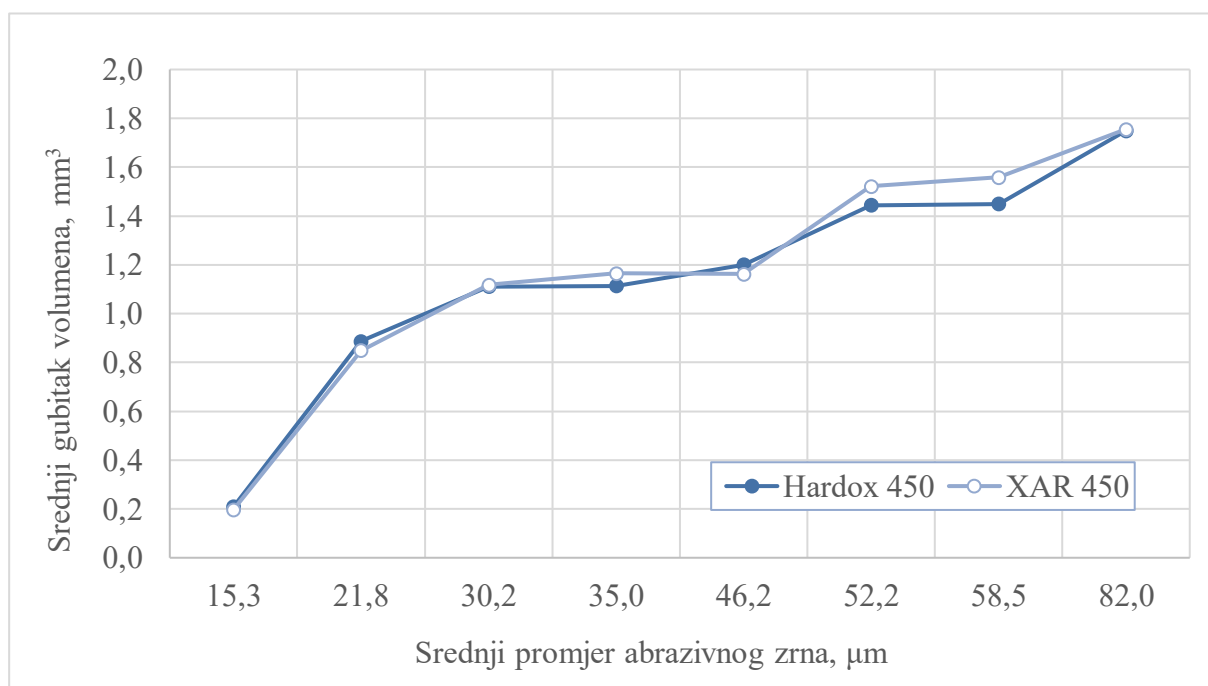
Slika 47. Usporedba gubitka volumena za čelik Hardox 450 i čelik XAR 450 pri ispitivanju otpornosti na abraziju standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“

5.5.4.2. Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na trošenje na uređaju Taber abrader

Rezultati ispitivanja na uređaju Taber abrader pokazuju da veličina abrazijskog zrna i kvaliteta brusnog papira imaju veliki utjecaj na gubitak volumena pri abraziji. S porastom abrazijskog zrna povećava se gubitak volumena kod oba čelika podjednako, slika 48. i slika 49. Ovisnost gubitka volumena o veličini abrazijskog zrna nije linearna i prirast gubitka volumena nije konstantan, nego se postupno smanjuje. Iako nije jasno izražen, može se uočiti fenomen koji je poznat pod nazivom „kritična veličina abrazijskog zrna“, koja bi se kod oba čelika nalazila između 21,8 μm (P800) i 30,2 μm (P500).



Slika 48. Usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader čelika Hardox 450 i XAR 450



Slika 49. Utjecaj veličine abrazivskog zrna na gubitak volumena čelika Hardox 450 i XAR 450

6. ZAKLJUČAK

Na temelju usporedbe rezultata dobivenih pri ispitivanju otpornosti na abraziju, mjerenju tvrdoće, analizi mikrostrukture i kemijskog sastava čelika Hardox 450 i XAR 450, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Oba analizirana čelika su niskougljični, ali čelik Hardox 450 sadrži puno više ugljika (0,14 %) od čelika XAR 450 (0,08 %). Sadržaj nečistoća (S i P) je vrlo nizak, oba čelika pripadaju skupini plemenitih čelika.
- Mikrostruktura obaju čelika je vrlo slična, homogena, i sastoji se od finoigličastog, sitnozrnatog martenzita.
- Dobivene vrijednosti tvrdoće HV2 obaju čelika podjednake su u svim presjecima i nalaze se u rasponu od 446 HV2 do 459 HV2. Vrijednosti tvrdoća HV0,2 i HV1 nešto su više od vrijednosti tvrdoće HV2, ali puno veća su i rasipanja rezultata.
- Pri ispitivanju otpornosti na abraziju metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“, kod čelika Hardox 450 u odnosu na čelik XAR 450, izmjeren je manji gubitak volumena za oko 8 %, što bi značilo da Hardox 450 ima bolju otpornost na abrazijsko trošenje. Međutim, rasipanja rezultata kod ovog čelika su puno veća nego kod čelika XAR 450.
- Pri ispitivanju na uređaju Taber abrader oba čelika pokazala su vrlo sličnu otpornost na abraziju. S porastom abrazijskog zrna povećava se gubitak volumena, a kritična veličina abrazijskog zrna nalazi se između 21,8 μm i 30,2 μm .

LITERATURA

- [1] Ivušić V. Tribologija. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb; 2002.
- [2] Zum Gahr K-H. Microstructure and wear of materials. vol. 10. Elsevier; 1987.
- [3] Ratia V. Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions.
- [4] Grilec K, Jakovljević S. Tribologija - autorizirana predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2015.
- [5] Czichost H. Tribology - a systems approach to the science and technology of friction lubrication and wear. 1978.
- [6] Rabinowicz E, Mutis A. Effect of abrasive particle size on wear. *Wear*. 1965.;8(5):381–90. doi: 10.1016/0043-1648(65)90169-9
- [7] Coronado JJ, Sinatora A. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1. *Wear*. 2011.;271(9–10):1794–803. doi: 10.1016/j.wear.2011.01.078
- [8] Nathan GK, Jones WJD. The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions. *Wear*. 1966.;9(4):300–9. doi: 10.1016/0043-1648(66)90004-4
- [9] Stevenson ANJ, Hutchings IM. Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. *Wear*. 1996.;195(1–2):232–40. doi: 10.1016/0043-1648(96)06965-7
- [10] Hawk JA, Wilson RD, Tyleczak JH. Laboratory abrasive wear tests : investigation of test methods and alloy correlation. 1999.;
- [11] Qiu F, Duan X, Dong B, Yang H, Lu J, Li X. Effects of Cr and Zr addition on microstructures, compressive properties, and abrasive wear behaviors of in situ TiB₂/Cu cermets. *Materials (Basel)*. 2018.;11(8):1–17. doi: 10.3390/ma11081464
- [12] Xue H, Peng W, Yu L, Ge R, Liu D, Zhang W, i ostali. Materials Science & Engineering A Effect of hardenability on microstructure and property of low alloy. 2020.;793. doi: 10.1016/j.msea.2020.139901
- [13] Szala M, Szafran M, Macek W, Marchenko S, Hejwowski T. Abrasion Resistance of S235, S355, C45, AISI 304 and Hardox 500 Steels with Usage of Garnet, Corundum and Carborundum Abrasives. *Adv Sci Technol Res J*. 2019.;13(4):151–61. doi: 10.12913/22998624/113244
- [14] Beköz Üllen N. Investigation of the wear resistance of Hardox steel plates. 2020.

- [15] Tarasiuk W, Napiórkowski J, Ligier K, Krupicz B. Comparison of the wear resistance of Hardox 500 steel and 20MnCr5. *Tribologia*. 2017.;273(3):165–70. doi: 10.5604/01.3001.0010.6254
- [16] Hardox 450 - The most popular structural wear plate - SSAB [Internet]. (pristupljeno: 20.8.2021.). Dostupno na: <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-450>
- [17] Steel Xar® - Product information for wear-resistant steels [Internet]. (pristupljeno: 20.8.2021.). Dostupno na: https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/produktinformationen/grobblech_2/xar/thyssenkrupp_xar_product_information_steel_en.pdf
- [18] Raex® 450 - Raex [Internet]. (pristupljeno: 20.8.2021.). Dostupno na: <https://www.raexsteel.com/products/450>
- [19] DILLIDUR 450 - Wear resistant steel [Internet]. (pristupljeno: 20.8.2021.). Dostupno na: <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/13354>
- [20] Abrasion Resistant, Water Quenched and Tempered Steels – BRINAR® 450 [Internet]. (pristupljeno: 20.8.2021.). Dostupno na: https://www.ilsenburger-grobblech.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/ilg/dokumente/Werkstoffblaetter/verschleissfeste_staehle_brinar450.pdf
- [21] Moore MA. The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials. *Wear*. 1974.;28(1):59–68. doi: 10.1016/0043-1648(74)90101-X
- [22] Filetin T, Kovačićek F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2002.
- [23] Cao Y, Wang Z dong, Kang J, Wu D, Wang G dong. Effects of Tempering Temperature and Mo/Ni on Microstructures and Properties of Lath Martensitic Wear-Resistant Steels. *J Iron Steel Res Int*. 2013.;20(4):70–5. doi: 10.1016/S1006-706X(13)60085-0
- [24] Zdravecká E, Tkáčová J, Ondáč M. Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steels. *Res Agric Eng*. 2014.;60(3):115–20. doi: 10.17221/20/2013-rae
- [25] Xu X, Xu W, Ederveen FH, Zwaag S van der. Design of low hardness abrasion resistant steels. *Wear* [Internet]. 2013.;301(1–2):89–93. doi: 10.1016/j.wear.2013.01.002

- [26] Borruto A, Taraschi I. Wear dependence on some factors characterizing the surface state: the hardness, the roughness and the surface degreasing. *Wear*. 1995.;184(2):119–24. doi: 10.1016/0043-1648(94)06554-3