

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Starčević

Zagreb, 2013. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Otpornost na eroziju brzoreznog čelika PM S390 MC

Mentor:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Student:

Martin Starčević

Zagreb, 2013 godina.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Franji Cajneru na podršci, korisnim savjetima i razumijevanju tijekom izrade završnog rada.

Posebno bih se zahvalio i asistentu Ivanu Kumiću na konstantnoj potpori, strpljenju i stručnom vođenju kroz proces izrade završnog rada.

Posebnu zahvalu dugujem svojim roditeljima i obitelji na potpori kroz cijeli studij.

Martin Starčević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN STARČEVIĆ** Mat. br.:0035170797

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OTPORNOSTI NA EROZIJU BRZOREZNOG ČELIKA PM S390 MC**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EROSION RESISTANCE OF PM S390 MC HIGH SPEED STEEL**

Opis zadatka:

Erozija česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice. Erozija kod koje je strujanje pod malim kutom u odnosu na površinu (do 30°) naziva se abrazivna erozija, a kad čestice udaraju o površinu gotovo okomito (60° do 90°) radi se o udarnoj eroziji.

U radu treba:

- Opisati mehanizme trošenja na eroziju
- Opisati načine ispitivanja trošenja erozijom
- Na različito obradenim ispitnim uzorcima od brzoreznog čelika proizvedenog metalurgijom praha oznake PM S390 MC planirati i ispitati otpornost na abrazivsku (upadni kut erodenta 30°) i udarnu eroziju (upadni kut erodenta 90°) uz primjenu dvaju različitih erodenta: kvarcnim pijeskom i čeličnim kuglicama.
- Analizirati dobivene rezultate.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	VI
1. UVOD.....	1
2. Erozija.....	2
2.1. Kut upada čestica	2
2.2. Ostali faktori koji utječu na erozijsko trošenje	6
3. Brzorezni čelici	9
3.1. PM postupak	9
3.2. Toplinska obrada.....	10
3.2.1. Postupci žarenja	10
3.2.2. Kaljenje	12
3.2.3. Duboko hlađenje	15
3.2.4. Popuštanje	19
3.3. Nitriranje	22
4. Eksperimentalni dio	26
4.1. Ispitivani materijal	26
4.2. Tribološka ispitivanjaerozijskog trošenja	26
4.3. Rezultati ispitivanja.....	29
Zaključak.....	43
Literatura	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz erozijskog trošenja [6]	2
Slika 2.	Ovisnost brzine erozije o kutu upada čestice za duktilne i krhke materijale [6].....	3
Slika 3.	Poligon sila u slučaju abrazivne erozije [9].....	3
Slika 4.	Poligon sila u slučaju udarne erozije [9]	4
Slika 5.	Oblik kratera i mehanizam odnošenja materijala kod duktilnih materijala [6].....	5
Slika 6.	Oblik kratera i mehanizam odnošenja materijala kod krhkih materijala [6].....	5
Slika 7.	Kvalitativni prikaz absorpcije energije gume i čelika [6]	6
Slika 8.	Utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje [6].....	6
Slika 9.	Utjecaj brzine gibanja čestice na erozijsko trošenje za kut od 90° [6].....	7
Slika 10.	Utjecaj oblika čestice na brzinu erozije [6]	7
Slika 11.	Ovisnost brzine erozije o temperaturi [6].....	8
Slika 12.	Proizvodnja PM proizvoda [12]	9
Slika 13.	Usporedba mikrostrukture klasičnog i PM brzoreznog čelika [13]	10
Slika 14.	Dijagram postupka sferoidizacije: a) s kontinuiranim, b) s diskontinuiranim hlađenjem [14].....	11
Slika 15.	Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [15].....	12
Slika 16.	Utjecaj temperature austenitizacije na krivulje M_s i M_f , kao i na udio zaostalog austenita [14]	13
Slika 17.	Utjecaj temperature i trajanja austenitizacije na krivulje konstantnih tvrdoća gašenja [14]	14
Slika 18.	Utjecaj temperature sredstva za gašenje na udio zaostalog austenita [14].....	15
Slika 19.	Uptonov dijagram [16]	16
Slika 20.	Dijagram toplinskog postupka za čelik PM S390 MC [2]	17
Slika 21.	Utjecaj temperature austenitizacije na volumi udio promjer neotopljenog karbia za čelik PM S390 MC [2]	17
Slika 22.	Utjecaj količine η -karbida na otpornost prema trošenju za čelik X160CrMoV121 [17]	18
Slika 23.	Utjecaj vremena držanja na količinu η -karbidaza različite temperature austneitizacije [17]	18
Slika 24.	Erozijska otpornost čelik PM S390 MC [2]	19
Slika 25.	Dijagram postupka popuštanja čelika s naznačenim slijedom pojava [14].....	20
Slika 26.	Krivulja popuštanja brzoreznog čelika u odnosu na ostaele čelike [15].....	21
Slika 27.	Dijagram postupka kaljenja i popuštanja brzoreznog čelika [14].....	22
Slika 28.	Mikrostruktura i raspodjela tvrdoće na nitiriranom uzorku Č1220 [18].....	23
Slika 29.	Mikrostruktura uzoraka brzoreznih čelika S390 [1].....	24
Slika 30.	Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama [6]	27
Slika 31.	Detalj A sa slike 30. [6].....	28
Slika 32.	Zrnca pijeska snimljena pretražnim elektronskim mikroskopom	29
Slika 33.	Dijagram erozijskog trošenja pijeskom za kut 90°	30
Slika 34.	Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja pijeskom pod kutem od 90°snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom.....	31
Slika 35.	Dijagram erozijskog trošenja pijeskom za kut 30°	32
Slika 36.	Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja pijeskom pod kutem od 30°snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom.....	34
Slika 37.	Dijagram erozijskog trošenja čeličnom sačmom za kut 90°	35

Slika 38.	Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja čeličnom sačmom pod kutom od 90° snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom	36
Slika 39.	Dijagram erozijskog trošenja čeličnom sačmom za kut 30°	38
Slika 40.	Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja čeličnom sačmom pod kutom od 30° snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom	39
Slika 41.	Usporedba pijeskom trošenih površina O uzorka sniman pretražnim elektronskim mikroskopom.....	40
Slika 42.	Usporedba sačmom trošenih površina O uzorka sniman pretražnim elektronskim mikroskopom.....	40
Slika 43.	Usporedba trošenih površina O uzorka pod kutom od 30° sniman pretražnim elektronskim mikroskopom.....	41
Slika 44.	Usporedba trošenih površina O uzorka pod kutom od 90° sniman pretražnim elektronskim mikroskopom.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastav faza uobičajenog brzoreznog čelika [14]	13
Tablica 2. Kemiski sastav brzoreznog čelika S390 MC (Böhler) [20]	26
Tablica 3. Toplinski parametri brzoreznog čelika S390 MC (Böhler) [20]	26
Tablica 4. Erozijsko trošenje pijeskom pod kutom od 90° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)	30
Tablica 5. Erozijsko trošenje pijeskom pod kutom od 30° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)	32
Tablica 6. Erozijsko trošenje čeličnom sačmom pod kutom od 90° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)	35
Tablica 7. Erozijsko trošenje čeličnom sačmom pod kutom od 90° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)	37

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VEČIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv veličine
θ_z	°C	temperatura žarenja
θ_a	°C	temperatura austenitizacije
θ_p	°C	temperatura popuštanja
θ_{dh}	°C	temperatura dubokog hlađenja
t_a	min	vrijeme austenitizacije
v_u	m/s	brzina gibanja uzorka
$v_{\check{c}}$	m/s	brzina gibanja erozijskih čestica
n_{okr}	min^{-1}	broj okretaja osovine

SAŽETAK

U ovom radu opisana je problematika trošenja brzoreznog čelika. U uvodu su opisani mehanizmi trošenja erozijom, kao i parametri koji utječu na erozijsko trošenje. Nakon opisa trošenja erozijom slijedi opis brzoreznih čelika, kao i mikrostruktura, toplinske obrade volumena, te nitriranje i kakav učinak te obrade imaju na mikrostrukturu i fizikalna svojstva brzoreznog čelika, naročito otpornost na trošenje.

U eksperimentalnom dijelu je opisano ispitivanje uzoraka brzoreznog čelika PM S390 MC, te su dijagramski prezentirani rezultati dobiveni ispitivanjima uzorka erozivnom djelovanju čestica pod kutovima 90° i 30° , i dvjema različitim vrstama erozivnih čestica.

1. UVOD

U metalnoj industriji alati mogu biti izložiti jako složenim i površinski zahtjevnim uvjetima iz čega proizlaze različiti rezultati. Alatni materijali moraju ispuniti mnoge zahtjeve koji u određenoj mjeri često nisu međusobno kompatibilni. Osim svojstava osnovnog materijala po presjeku, značajan (ako ne i izraženiji) utjecaj na žilavost i vijek trajanja alata imaju tribološka svojstva njegove površine. Raznim parametrima unutar toplinske obrade moguće je modificirati mikrostrukturu alatnih čelika, a samim tim i promijeniti i optimirati mehanička i tribološka svojstva materijala [1].

Konvencionalne toplinske obrade alata izrađenih od brzoreznog čelika su austenitizacija na visokim temperaturama, gašenje i popuštanje. Nakon kaljenja prisutni znatni udio visokolegiranog zaostalog austenita visokim popuštanjem pretvara se u karbide popuštanja i sekundarni martenzit. To rezultira povećanjem tvrdoće i stabilizira dimenzije alata. Smanjenje udjela zaostalog austenita nakon gašenja može se postići ne samo kaljenjem nego i dubokim hlađenjem. Kako bi se postigla optimalna kombinacija svojstava brzoreznih čelika moraju se odrediti optimalni parametri toplinskih obrada kao što su temperatura austenitizacije te temperatura i trajanje dubokog hlađenja [2].

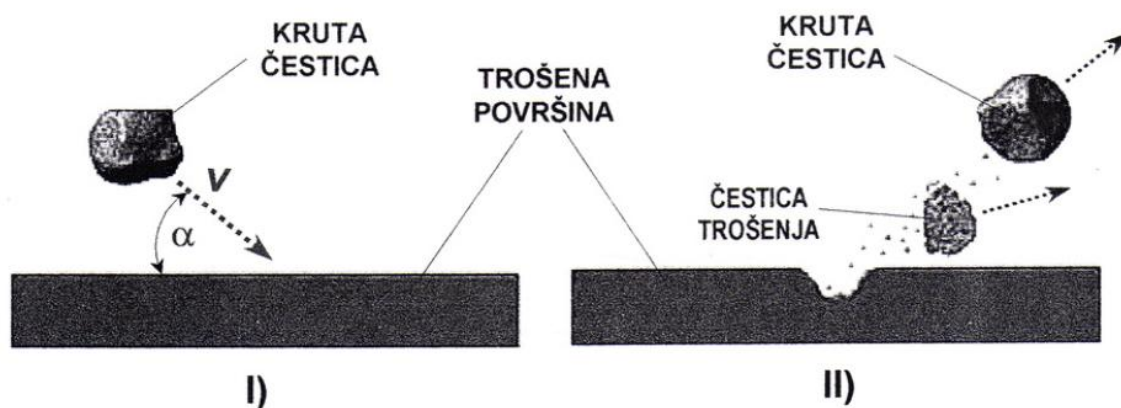
Druge metode kojima je moguće modificirati površine alata u svrhu povećanja otpornosti na trošenje su toplinsko-kemijske površinske metode poput cementiranja, nitriranja, nitrokarburiranja, PVD, CVD, PACVD i drugi [1].

U ovom radu neće biti riječ o metodama modificiranja površina, već je cilj ustanoviti razliku u svojstvima površina uzoraka brzoreznog čelika PM S390 MC koji su prošli različite toplinske obrade cijelog volumena, sa posebnim naglasnom na erozijska svojstva površine. Uzorci će biti izloženi uvjetima erozijskog trošenja pijeskom i sačmom, isto tako i različitim kutovima upada, nakon čega će biti provedena detaljna analiza podataka prikupljenih eksperimentalnim putem.

2. EROZIJA

Erozija se može definirati kao gubitak materijala uslijed iznimno kratki kliznih pokreta koji nastaju u kratkim vremenskim intervalima. Erozija nastaje kada čestice udaraju o površinu i uklanjaju materijal s te površine [3].

Na erozijsko trošenje utječu razni faktori. Primarni faktori koji utječu na erodirane površine su karakteristike čestice koja udara od površinu, kao što su oblik, tvrdoća, brzina udara i upadni kut čestice [4]. Kod erozije su dominantni mehanizmi trošenja abrazija i umor površine [5].

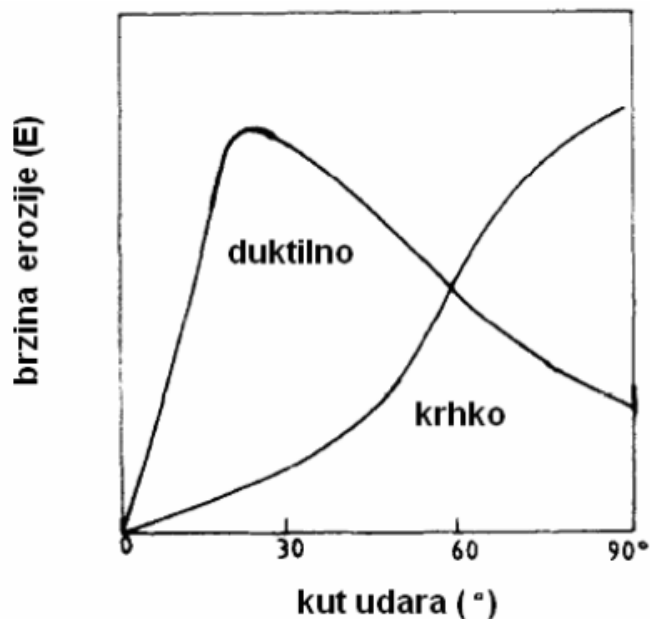


Slika 1. Shematski prikaz erozijskog trošenja [6]

Slika 1 prikazuje shemu jediničnog erozijskog trošenja koje se sastoji od dvije faze. U prvoj fazi kruta čestica upada određenom brzinom i pod određenim kutom, te se sudara s trošenom površinom. U drugoj fazi kruta se čestica odbija od trošene površine i razara površinu otkidajući komadić materijala u obliku čestice trošenja.[6].

2.1. Kut upada čestice

Ovisno o kutu upada čestice erozijsko trošenje možemo podijeliti na abrazivnu eroziju pod malim kutom i udarnu eroziju pod velikim kutom gotovo okomitim na površinu, gdje se kut upada definira kao kut između erodiranog materijala i trajektorije krute čestice, [6, 7].



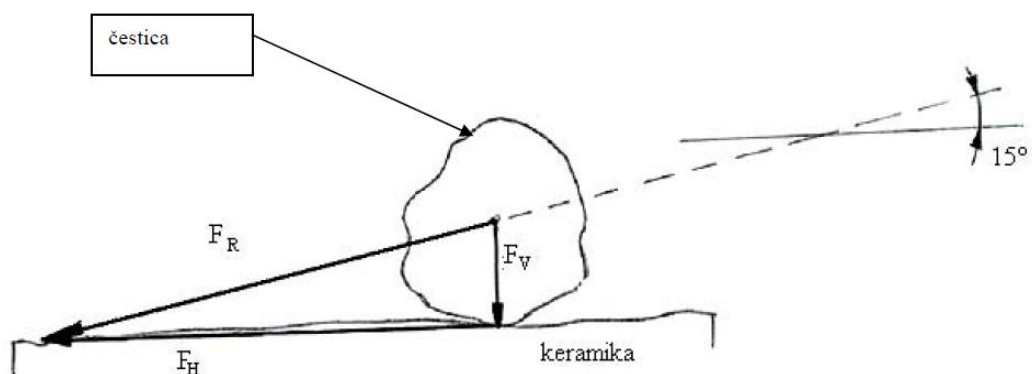
Slika 2. Ovisnost brzine erozije o kutu udara čestice za duktilne i krhke materijale [6]

Na slici 2 vidi se da su duktilni materijali, kao što su metali i legure, podložniji eroziji pri manjim kutovima udara čestice, dok su krhki materijali kao npr. staklo, keramika podložniji pri većim kutovima, oko 90°.

Abrazivna erozija

Pri malim kutovima udara kinetička energija čestice uzrokuje efekt „oranja“ površine, dok tek vrlo mali dio kinetičke energije djeluje u smjeru normale na površinu, izazivajući slabija ponavljajuća udarna opterećenja.

Za efekt „oranja“ su ključni mehanizmi plastične deformacije i rezanja materijala uzrokovani klizanjem čestice, dok su udarna naprezanja odgovorna za inicijaciju i širenje interkristalnih mikropukotina, [8, 9].

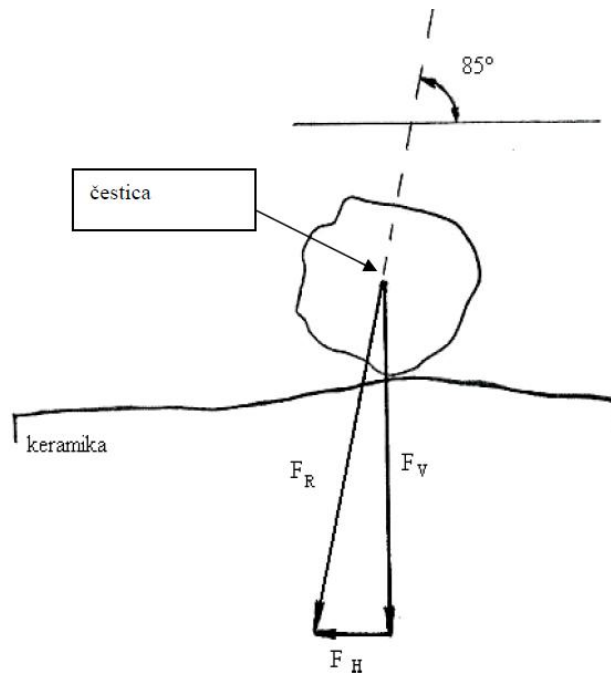


Slika 3. Poligon sila u slučaju abrazivne erozije [9]

Na slici 3 je vidljivo kako je dominantna horizontalna komponenta sile (F_H) koja uzrokuje struganja čestice od površinu (abrazija), dok mnogo manja vertikalna komponenta sile (F_V) odgovara nastanku pukotina, [9].

Udarne erozija

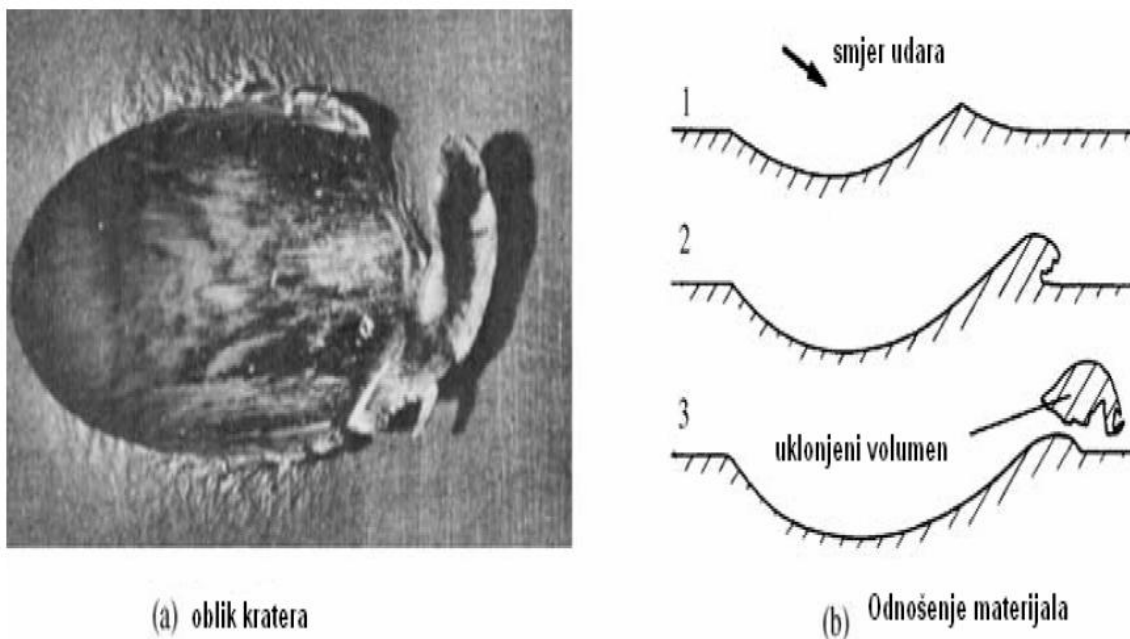
Pri velikim kutovima upada kinetička energija čestice najviše pridonosi udarnom opterećenju [8].

**Slika 4. Poligon sila u slučaju udarne erozije [9]**

Slika 4 prikazuje kako dominantna vertikalna komponenta sile (F_V) pridonosi nastanku pukotina u površinskim slojevima materijala, [9].

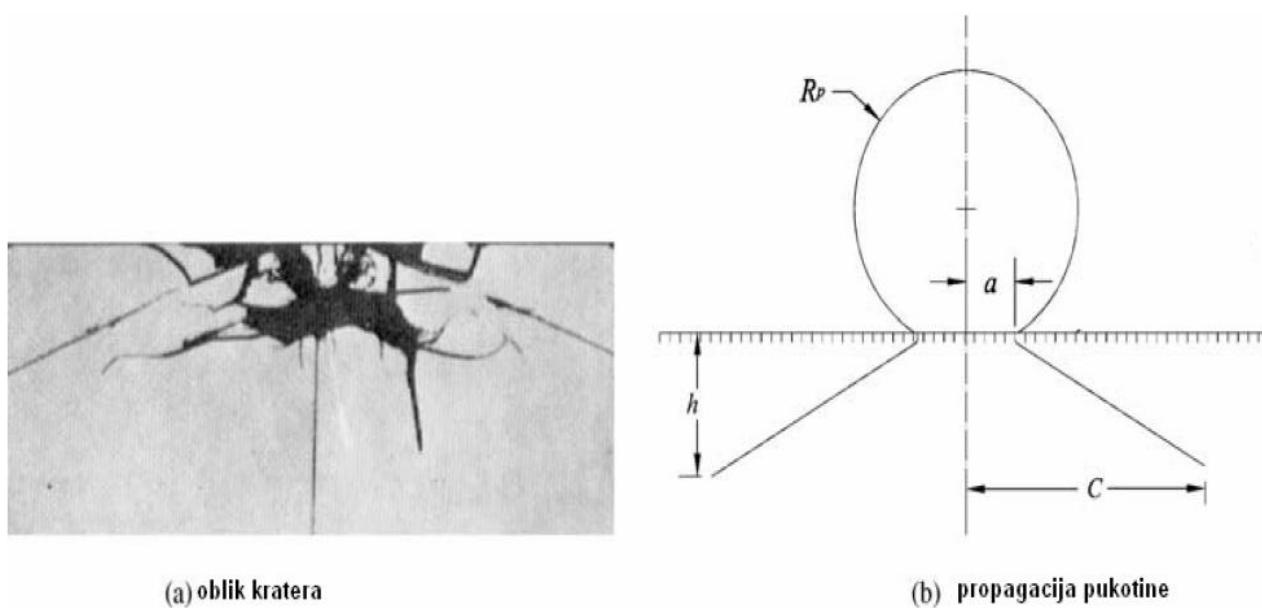
Oblik kratera

Promjena kuta upada čestice značajno utječe na stupanj erozije, kao što je vidljivo iz prethodnog, što rezultira razlikama intenziteta odnošenja materijala kod duktilnih, odnosno krhkih materijala.



Slika 5. Oblik kratera i mehanizam odnošenja materijala kod duktilnih materijala [6]

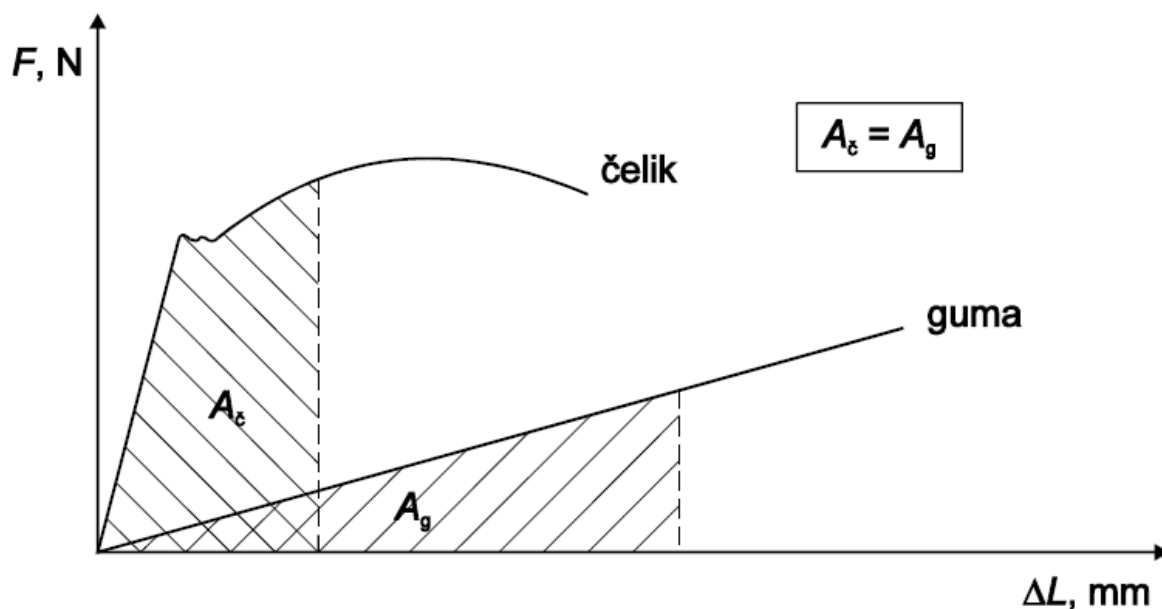
Oblik kratera prikazan na slici 5 nastaje uslijed djelovanja abrazivne erozije na površini duktilnog materijala. Vidljivo je kako je krater nastao udarom čestice o površinu i klizanjem uz istu izazivajući plastične deformacije i pred kraj puta odrezala srh materijala s površine, a tom je pridonijela dominantna horizontalna sila kako je prikazano na slici 3.



Slika 6. Oblik kratera i mehanizam odnošenja materijala kod krhkih materijala [6]

Pri djelovanju udarne erozije na krhki materijal nastaju radijalne i/ili konusne pukotine. Udaranjem čestice o površinu materijala pukotina se širi u dubinu materijal i nastaje krater kakav je prikazan na slici 6.

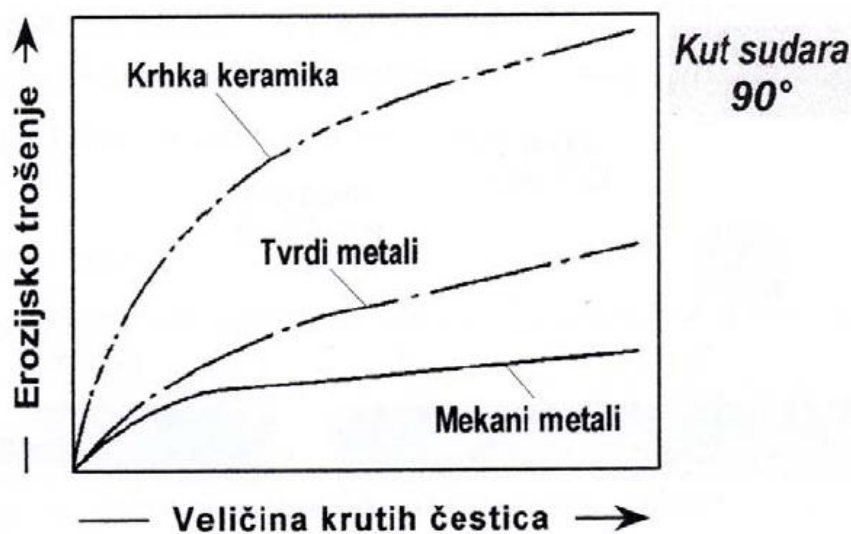
Kod erozijskog trošenja važno je elastično svojstvo materijala, tj. sposobnost apsorpcije energije čestica elastičnom deformacijom, slika 7 [6].



Slika 7. Kvalitativni prikaz apsorpcije energije gume i čelika [6]

2.2. Ostali faktori koji utječu na erozijsko trošenje

Veličina krutih čestica

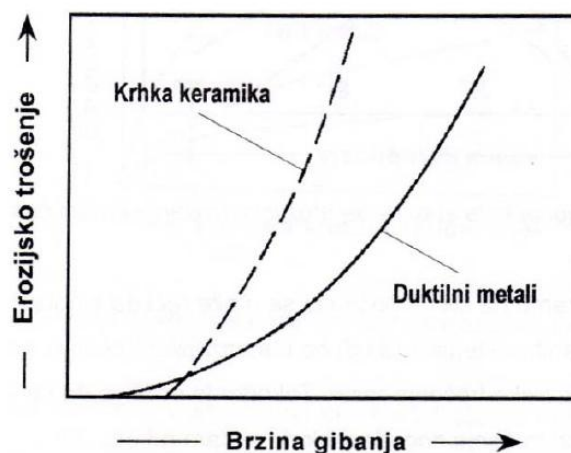


Slika 8. Utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje [6]

Porastom veličine čestice erodenta, intenzivnije je i trošenje površine o koju te čestice udaraju. Razlog tome je veća kinetička energija koju veće čestice prenose na površinu nepromijenjenih dimenzija. Stoga je razumljivo i povećanje osjetljivosti krhkih materijala na porast veličine čestica, posebice u slučaju udarne erozije.

Brzina gibanja čestice

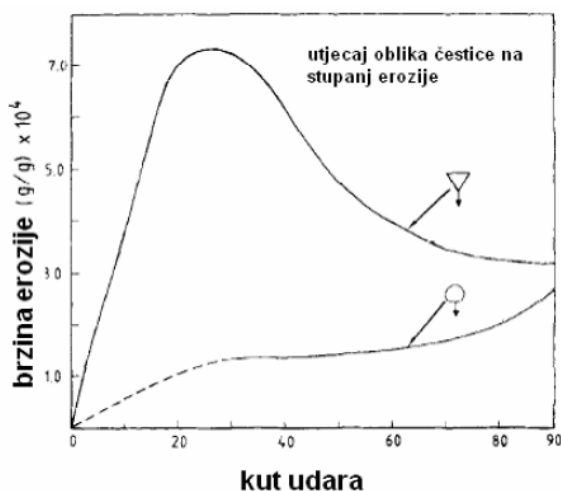
Brzina gibanja čestice koja udara o trošenu površinu, glavni je čimbenik njezine udarne energije, budući da se radi o kinetičkoj energiji u čijem iznosu sudjeluje s kvadratnom ovisnosti. Zbog te ovisnosti brzina gibanja ima vrlo izražen utjecaj erozijskog trošenja.



Slika 9. Utjecaj brzine gibanja čestice na erozijsko trošenje za kut od 90° [6]

Na dijagramu na slici 9 vidljivo je kako se povećanjem brzine gibanja povećava i stupanj erozijskog trošenja. Kod krhkih materijala je porast trošenja veći zbog slabijeg svojstva apsorpcije energije spram duktilnih materijala.

Oblik erozivnih čestica

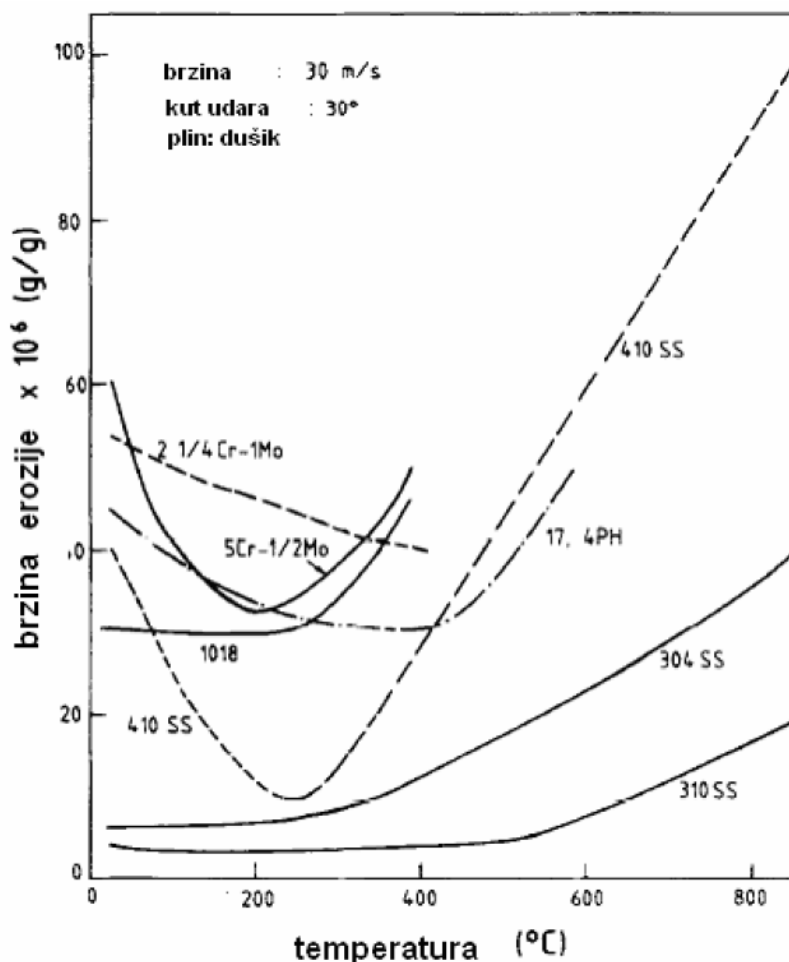


Slika 10. Utjecaj oblika čestice na brzinu erozije [6]

Na međuzavisnost brzine erozije i kuta udara čestice također utječe i oblik čestice. Dijagram na slici 10 prikazuje nam kako nepravilni oblik čestica koje udaraju o površinu materijala uzrokuju znatno veće trošenje materijala od čestica koje su pravilnijeg kuglastog oblika. Isto tako je sa dijagrama vidljivo da najveće trošenje materijala nepravilnim česticama je usred abrazivne erozije, dok kod pravilnijih čestica je kod udarne erozije.

Temperatura

Pri erozijskom trošenju jako je bitna temperatura okoline u kojoj se proces odvija.



Slika 11. Ovisnost brzine erozije o temperaturi [6]

Iz dijagrama na slici 11 je vidljivo kako postoje složene krivulje koje opisuju utjecaj temperature na erozijsko trošenje, ali se taj utjecaj najlakše može pojasniti krivuljama 304 SS i 310 SS. Krivulje 304 SS i 310 SS nam prikazuju kako porastom temperature raste i erozivno trošenje, jer porastom temperature materijal postaje duktilniji. Porastom duktilnosti materijala dolazi do odsijecanja većeg srha na kraju puta čestice po površini, što je slučaj kod abrazivne erozije (slika 5).

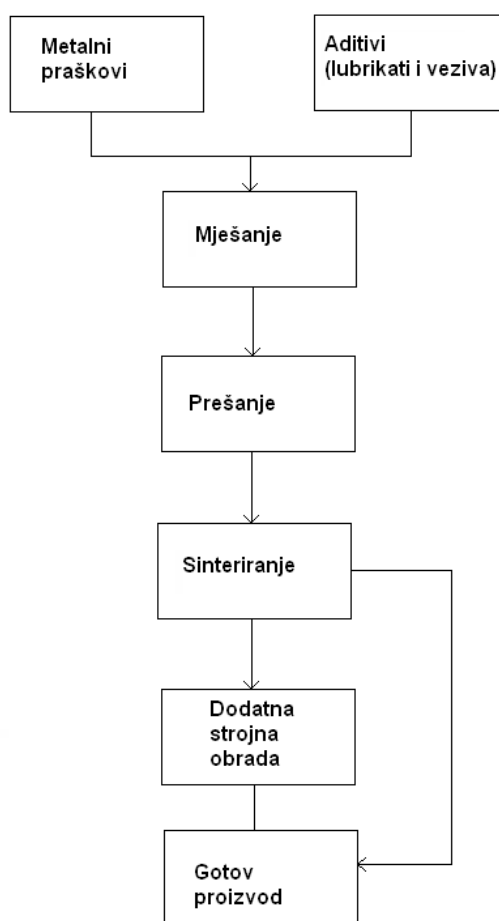
3. BRZOREZNI ČELICI

Brzorezni čelici su podskupina alatnih čelika koji se koriste za izradu reznih alata. Superiorniji su klasičnim alatnim čelicima time što se pri višim temperaturama tvrdoća ne smanjuje. To svojstvo omogućuje brzoreznim čelicima veću brzinu rezanja, što im je i dalo ime brzorezni čelici. Pri sobnoj temperaturi pokazuju visoku tvrdoću, preko 60 HRC, i visoku abrazijsku otpornost u odnosu na obične ugljične i ostale alatne čelike [9].

3.1. PM-postupak

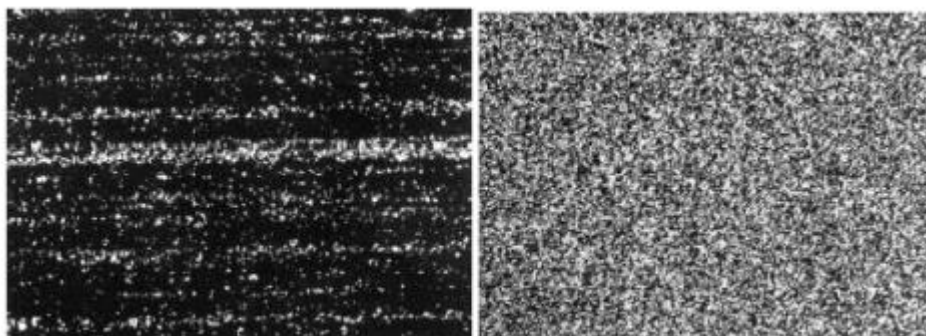
Metalurgija praha ili PM (eng. *Powder Metallurgy*) je tehnološki postupak koji sjedinjavanjem čestica praška jednog ili više metala daje čvrsti metalni proizvod.

PM-postupkom se proizvodi materijali iznimno fine i homogene mikrostrukture, i omogućava formulaciju materijala sastavljenog od različitih sastojaka koji daju jedinstvene kombinacije svojstava. [11]



Slika 12. Proizvodnja PM proizvoda [12]

Slika 12 shematski prikazuje postupak proizvodnje PM proizvoda. Prva fazi se miješaju metalni prašci s aditivima, što uključuje lubrikante i veziva. U idućoj fazi se mješavina preša u kalup, nakon čega slijedi sinteriranje. Sinteriranje je proces gdje se materijal zagrijava na temperaturu ispod tališta u zaštitnoj atmosferi. Nakon sinteriranja izradak može proći kroz dodatne strojne obrade po potrebi, [11].



Slika 13. Usporedba mikrostrukture klasičnog i PM brzoreznog čelika [13]

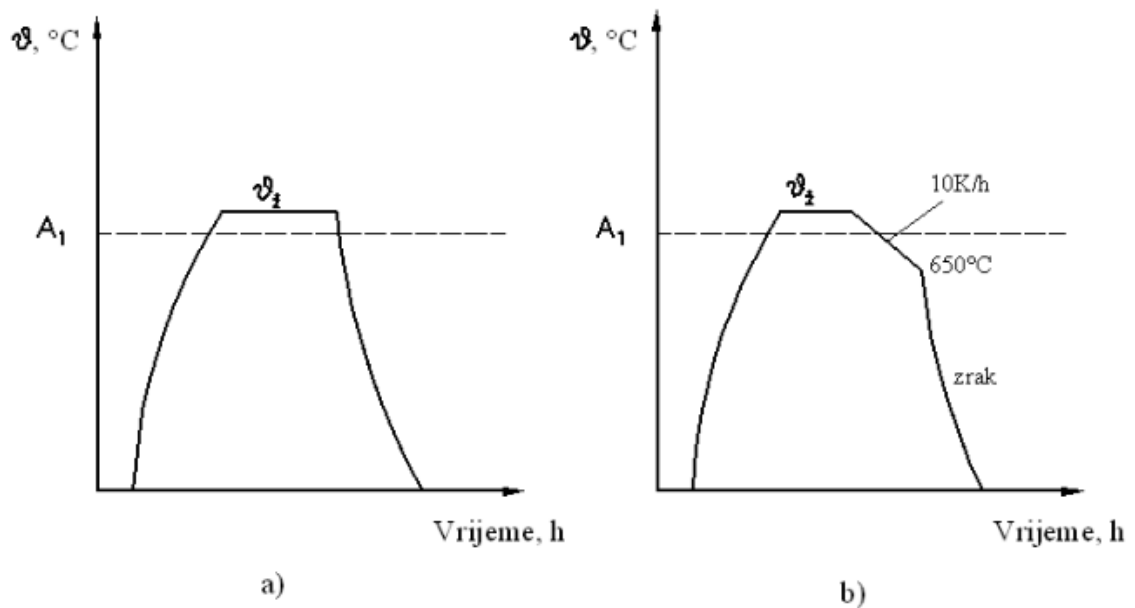
Slika 13 uspoređuje mikrostrukture klasičnog (lijeva) i PM dobivenog (desna) brzoreznog čelika. Vidljivo je kako je mikrostruktura PM uzorka finija izražena segregacijom karbida i to ujednačenog zrnatog oblika. Ovakva dobivena ujednačena struktura i fini karbidi doprinose povećanju otpornosti trošenju, a istovremeno i žilavosti. U kontrastu povećanje žilavosti bi se postiglo uz posljedicu smanjenja tvrdoće. Iz tog razloga PM alatni čelici imaju tendenciju da reagiraju brže i uz bolju predvidljivost na toplinsku obradu, pod uvjetom da se koriste isti osnovni procesi kao i kod klasičnih alatnih čelika. [13]

3.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika

3.2.1. Meko žarenje

Meko žarenje brzoreznog čelika se koristi za poboljšanje obradivosti odvajanjem čestica i pripreme strukture za učinkovito kaljenje. Tijekom ove toplinske obrade eventualno prisutni karbidi tipa M_2C potpuno se pretvaraju u mekše karbide tipa M_6C . Meko žarenje se ne koristi na kaljenim i popuštenim alatima, ali ako ima potrebe za obradu odvajanja čestica na već popuštenom komadu, koristit će se žarenje za raskaljivanje.

Postupak mekog žarenja prikazan je dijagramima na slici 14.



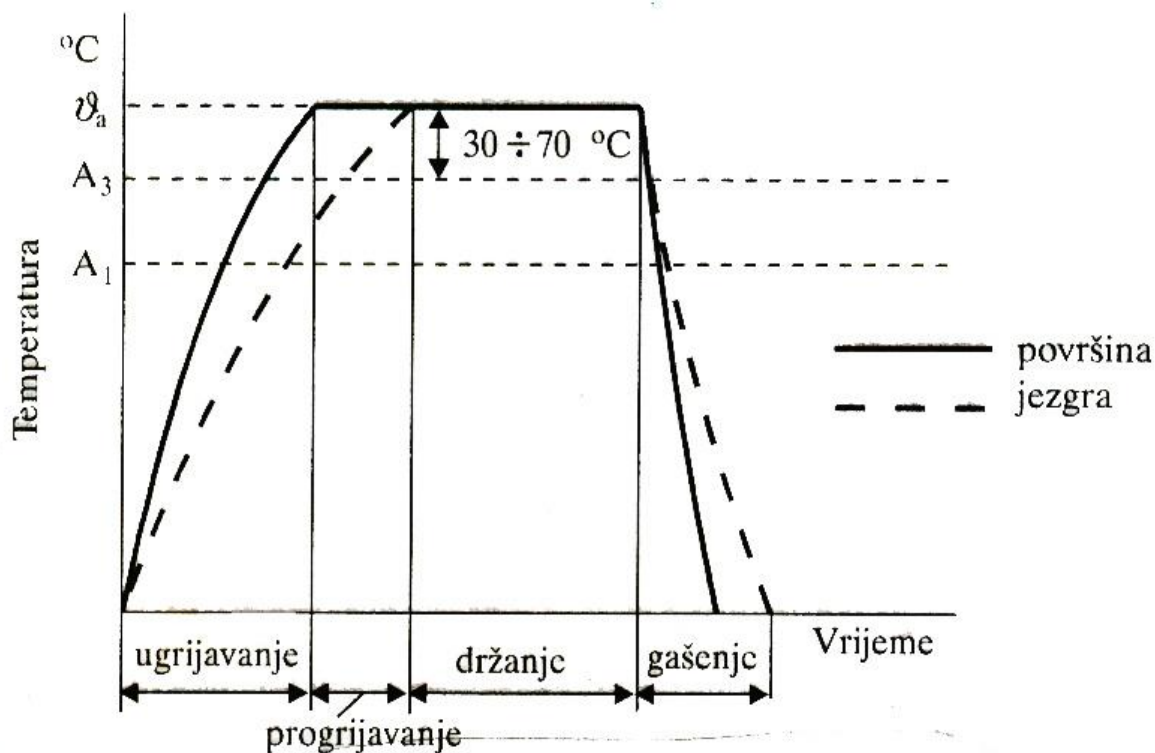
Slika 14. Dijagram postupka sferoidizacije: a) s kontinuiranim, b) s diskontinuiranim hlađenjem [14]

Obje varijante postupka sa slike 14 ne dovode čelik u stanje najniže tvrdoće, što nije ni cilj sferoidizacije. Suviše niske vrijednosti tvrdoće dobivene žarenjem učinit će površinske slojeve obratka slabije obradivim odvajanjem čestica što će utjecati i na kvalitetu obrađene površine. Ovi postupci žarenja kao i svi postupci pri visokim temperaturama zahtijevaju zaštitu od razugljičenja i oksidacije. [14]

Kao što je gore navedeno meko žareni čelik je pogodan za strojnu obradu, te nakon strojne obrade čelik se mora nekom drugom toplinskom obradom dovesti u željeno strukturno stanje kako bi se postigla željena eksploatacijska svojstva. [15]

3.2.2. Kaljenje

Kaljenje je toplinska obrada koja se provodi u svrhu postizanja maksimalne tvrdoće te što jednoličnijeg prokaljenja (tj. što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku). Postupak se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije (θ_a) i predgrijavanja, držanja pri temperaturi austenitizacije (u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu) i gašenja (u svrhu postizanja martenzitne strukture). Kako su kaljeni čelici tvrdi, strojna obrada prethodi kaljenju. [15]



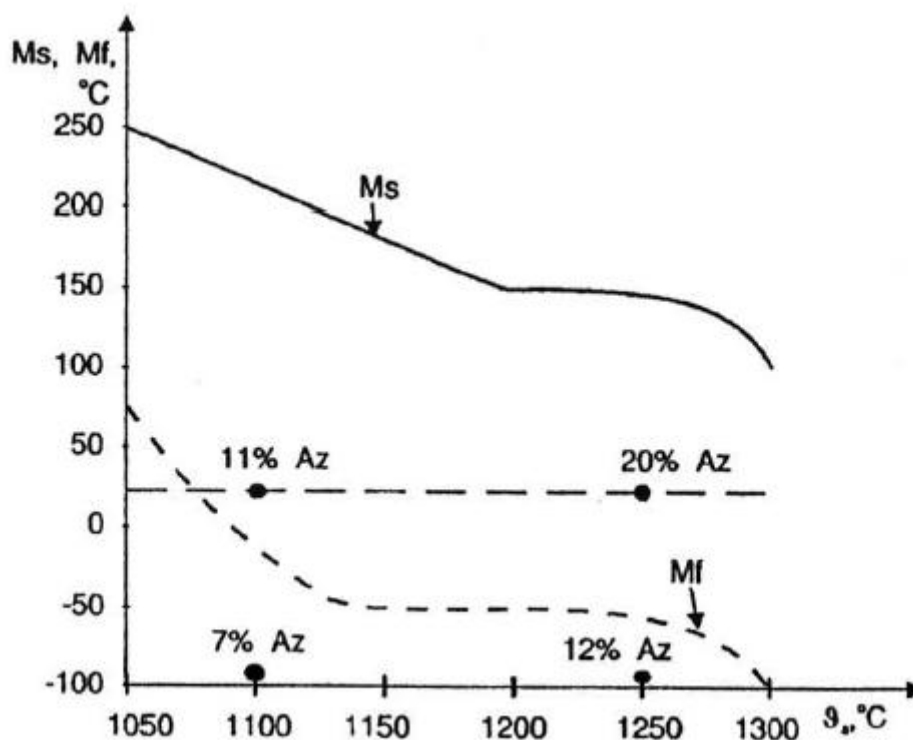
Slika 15. Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika [15]

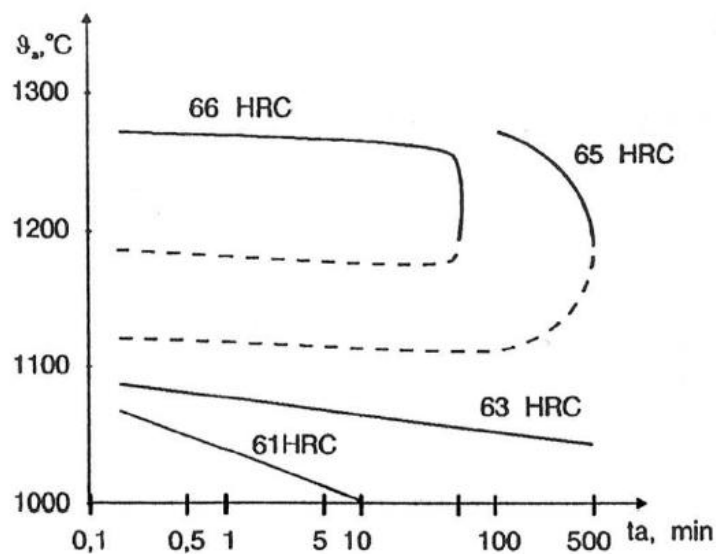
Kako su svi brzorezni čelici podeutektičkog tipa, treba odabrati temperaturu austenitizacije tako da nastali austenit otopi 0,5 do 0,6 %C. Temperature austenitizacije su vrlo visoke, tek nekoliko Kelvina ispod solidusa. Zbog visoke legiranosti, brzorezni čelici imaju nizak koeficijent toplinske vodljivosti, a koeficijent prijelaza topline kod zagrijavanja su vrlo visoki, što alate izlaže vrlo intenzivnom toplinskom udaru. Zbog toga je potrebno alate od brzoreznog čelika predgrijavati. Predgrijavanje se može izvoditi u vakuumskim pećima i u solnim kupkama. Pri drugom i trećem predgrijavanju počinje i otapanje karbida, posebno onih tipa $M_{23}C_6$. Tablica 1 prikazuje promjenu sastava pojedinih faza uslijed austenitizacije.

Tablica 1. Sastav faza uobičajenog brzoreznog čelika [14]

Faza	Približni sastav, %			
	C	Cr	W	V
Čelik- ukupno	0,75	4	18	1
Ferit, 20°	-	2	>1,5	>0,5
Austenit, 1280°	0,4...0,5	4	7,5...8,5	0,6...0,8

U slučaju nedovoljno pouzdanih termoelemenata i regulatora temperature doći će do djelomičnog rastavljanja po granici austenita i ponovnog stvaranja ledeburitne strukture. Iz dijagrama na slici 16 se vidi potreba za vrlo preciznom regulacijom temperature austenitizacije. Naime, gašenjem brzoreznog čelika do sobne temperature, želi se postići udio zaostalog austenita 20 % do 25%, za što bi temperatura pretvorbe austenita u martenzit M_s iznosila 130 do 150°C, a temperatura završetka pretvorbe u martenzit M_f oko -80°C. Isto tako se iz dijagrama vidi potrebna temperatura austenitizacije da se postigne potrebni udio zaostalog austenita.

Slika 16. Utjecaj temperature austenitizacije na krivulje M_s i M_f , kao i na udio zaostalog austenita [14]

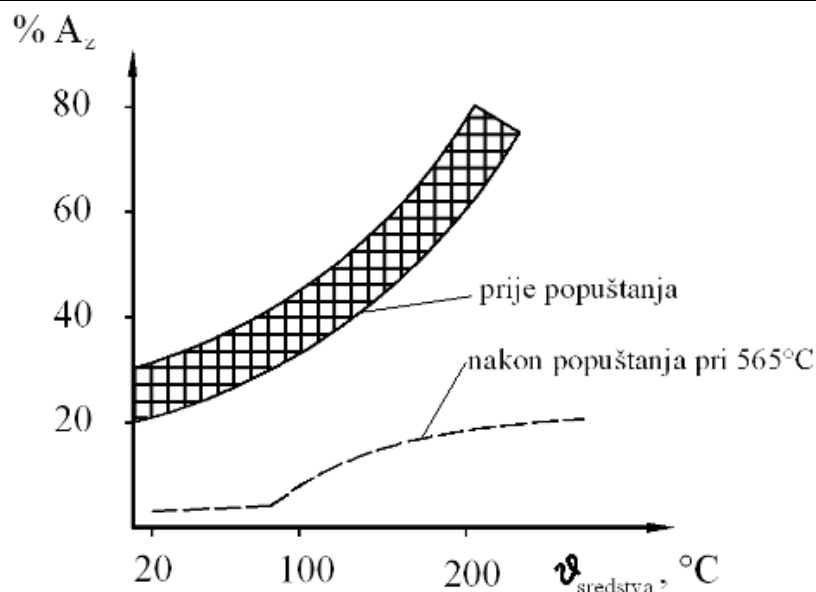


Slika 17. Utjecaj temperature i trajanja austenitizacije na krivulje konstantnih tvrdoća gašenja [14]

Pri tumačenju dijagrama na slici 16 treba uzeti u obzir i potrebu za postizanje udjela 20% A_z kako bi i tvrdoća nakon popuštanja mogla biti visoka. Zato se od krivulja 66 i 65 HRC_g samo koriste dijelovi izvučeni punom crtom.

Iz dijagrama sa slike 16 i 17 može se zaključiti o potrebi vrlo precizne regulacije, kako temperature austenitizacije, tako i držanja pri toj temperaturi.

Kod kaljenja brzoreznog čelika isto tako je važno obratiti pozornost na gašenje. Brzorezni čelik se kali u ulju, toploj kupci i na zraku, s tim da se hlađenje na zraku mora uzeti u rezervu zbog mogućnosti nastajanja nepoželjnih kemijskih reakcija s kisikom i vlagom iz zraka. Pri gašenju u ulju dolazi do nastajanja zaostalih naprežanja, što dovodi do predispozicije nastanka površinskih pukotina. No, popuštanjem će se ta naprežanja smanjiti.

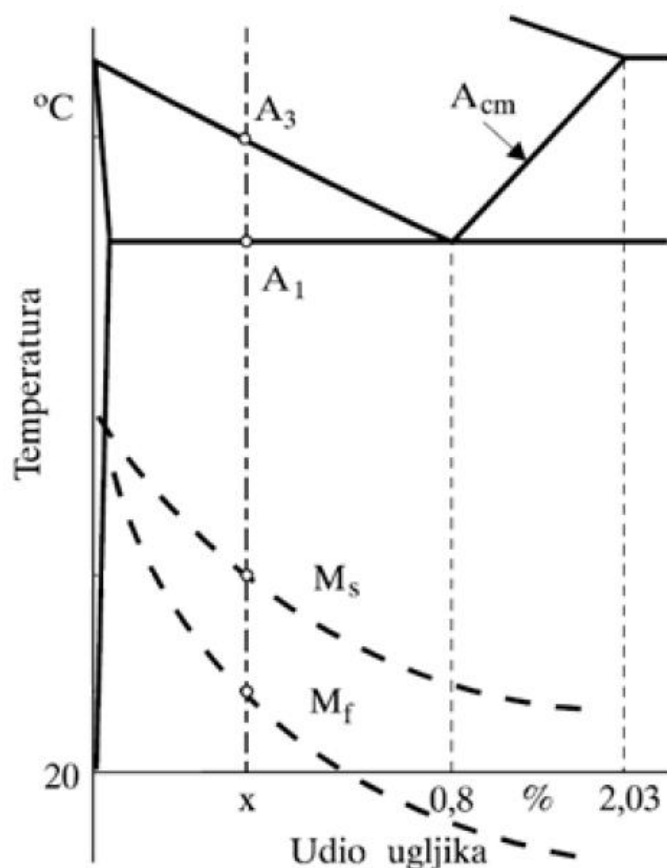


Slika 18. Utjecaj temperature sredstva za gašenje na udio zaostalog austenita [14]

Veća opasnost nastaje od pretjeranog ugrijavanja uljnih kupki. Dijagram na slici 18 prikazuje tu štetnost. Iz dijagrama je vidljivo da čelik gašen u sredstvu (ulje) visoke temperature nakon kaljenja ima veći udio zaostalog austenita. Kada bi se gasilo u ulju temperature 200 °C, nakon gašenja obradak bi imao oko 80% A_z . Nakon popuštanja taj udio bi iznosio oko 20%. Jedino rješenje da se ublaži ovaj nepovoljni utjecaj je višestruko popuštanje. Može se zaključiti da temperatura sredstva za gašenje (ulja) mora biti što niža, ali ipak ne toliko niska da ulje postane suviše viskozno.

3.2.3. Duboko hlađenje

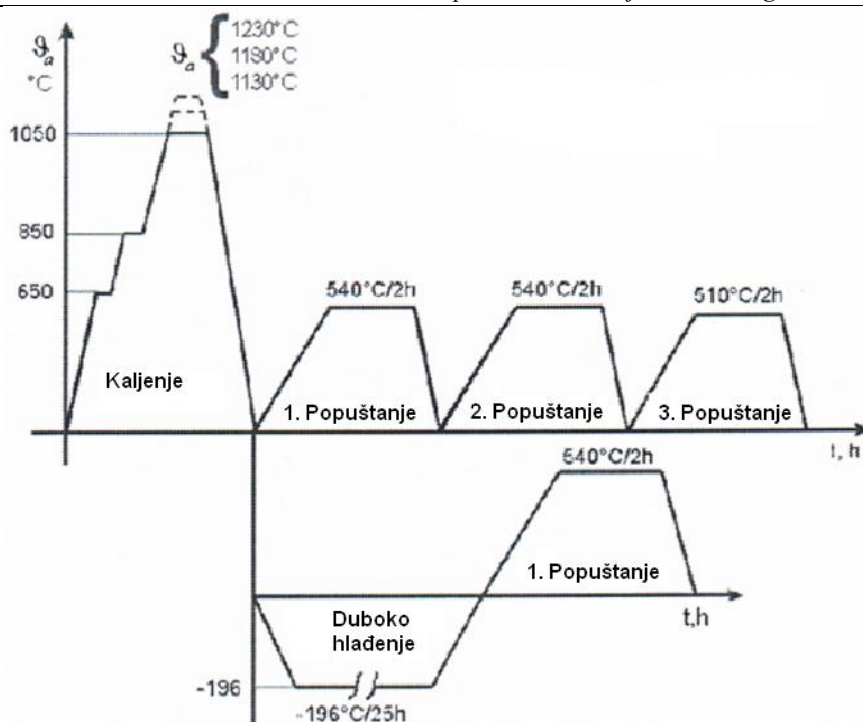
Smisao dubokog hlađenja je u tomu što se pri tom procesu čitav zaostali austenit pretvara u martenzit i što se odvija precipitacija finog η -karbida u martenzitnoj matrici. Prednosti koje proizlaze iz ovoga su dimenzijska stabilnost, otpornost na umor i abraziju, povećanje čvrstoće i tvrdoće brzoreznog čelika [1].



Slika 19. Uptonov dijagram [16]

Pri vrlo brzom hlađenju (gašenju) metastabilno kristaliziranih Fe-C legura (čelika) granice pretvorbi A_1 , A_3 i A_{cm} prelaze u jednostavnu krivulju M_s (eng. martenzit start) koja označava početak stvaranja nove faze martenzit koja se označava simbolom M. M_s spaja točke fazne pretvorbe $A \Rightarrow M$. Iz dijagrama na slici 19 može se uočiti kako s povećanjem sadržaja ugljika u čeliku temperatura početka pretvorbe austenita u martenzit M_s se smanjuje. Na isti način se snižava i temperatura završetka pretvorbe M_f (eng. martensit finish). [16]

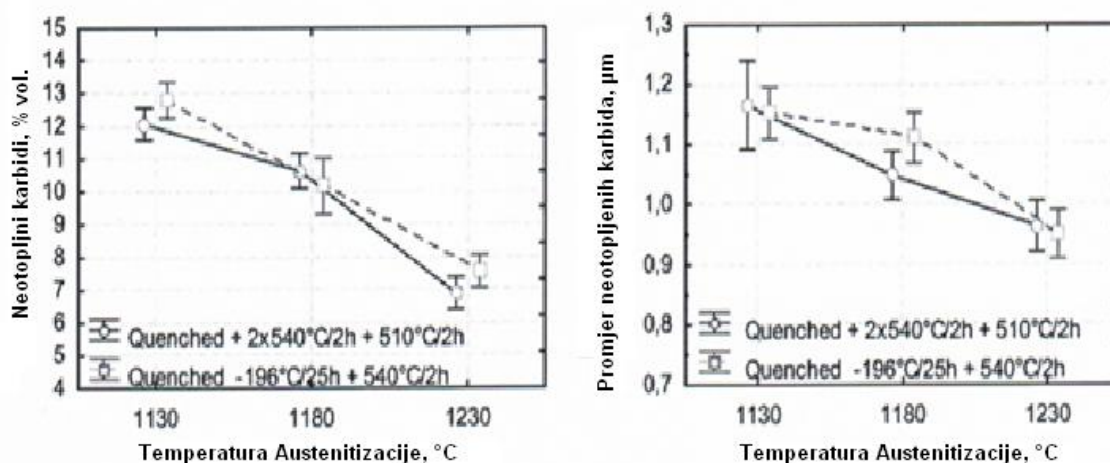
Kako tipični brzorezni čelik ima 0,75% C (tablica 1), iz dijagrama na slici 19 se vidi kako mu je temperatura M_f manja od sobne temperature, kako je navedeno u poglavlju kaljenje, gašenjem do sobne temperature brzorezni čelici imaju u sebi 20 do 25% A_z . Primjenom dubokog hlađenja na brzoreznom čeliku eliminira se zaostali austenit.



Slika 20. Prikaz dva načina kaljenja brzoreznog čelika PM S390 MC [2]

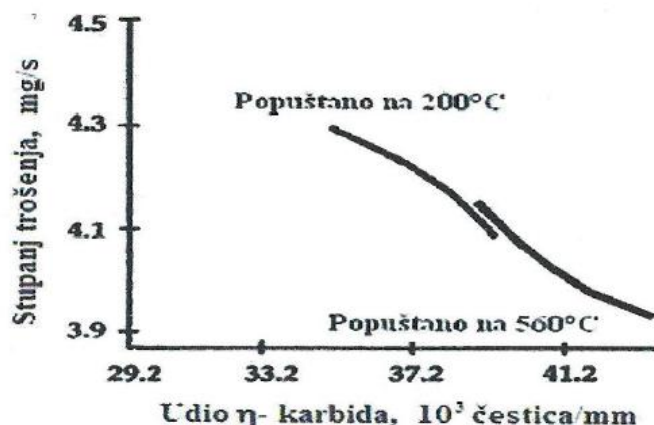
Na slici 20 prikazan je dijagram tipičnog tijeka toplinske obrade brzoreznog čelika. Donji dijagram predstavlja proces dubokog hlađenja koji se odvija tako da se kaljenje čelik nastavlja dalje hladiti tekućim dušikom do temperature -196°C na kojoj se drži 25 sati, nakon čega slijedi popuštanje na temperaturi od 540°C .

Duboko hlađeni brzorezni čelici imaju tvrdoću 66 HRC, dok kaljeni i tri put popušteni brzorezni čelici imaju tvrdoću do 65 HRC.



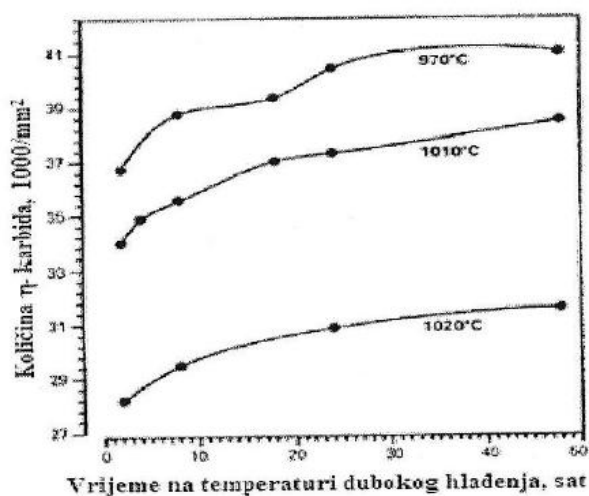
Slika 21. Utjecaj temperature austenitizacije na volumni udio i veličinu neotopljenog karbida za čelik PM S390 MC [2]

Iz lijevog dijagrama na slici 21 vidljivo je kako se porastom temperature austenitizacije smanjuje udio neotopljenog karbid i veličina karbida. Usporede li se rezultati kaljenog i trostruko popuštenog (puna crta) i duboko hlađenog uzorka ne uočava se bitna razlika u udjelu neotopljenih karbida. Razlog tomu jest primjenjene jednake temperature austenitizacije u oba slučaja, a otapanje karbida posljedica je upravo visine temperature austenitizacije (i vremena). [2]



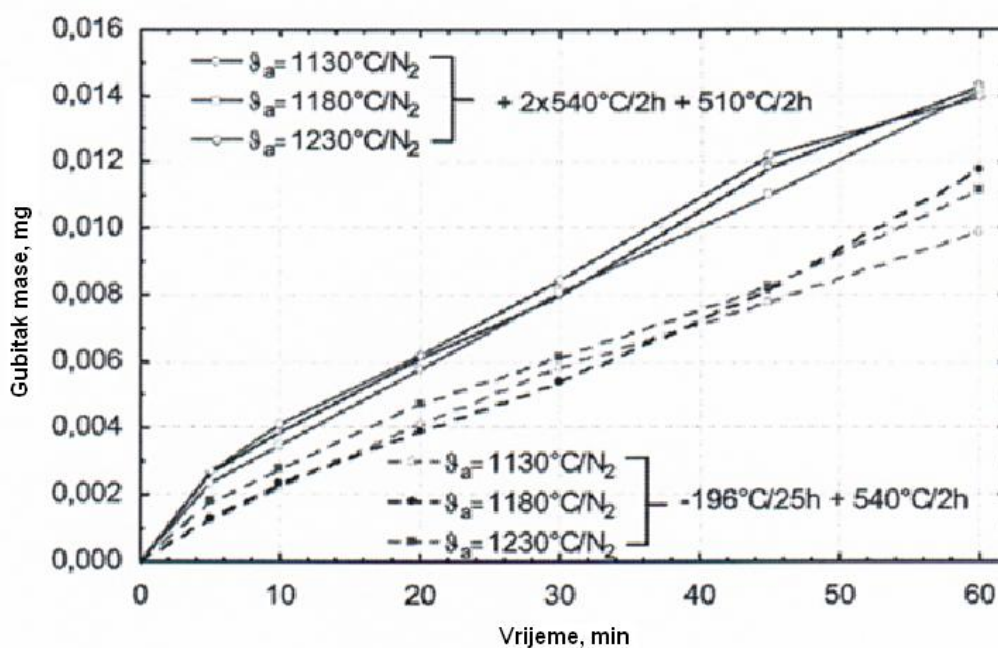
Slika 22. Utjecaj količine η -karbida na otpornost prema trošenju za čelik X160CrMoV121 [17]

Na, i ako duboko hlađenje nema utjecaj na količinu neotopljenih karbida, samo kombinacijom dubokog hlađenja i popuštanja u mikrostrukturi nastaje fini η -karbid. Što je veći udio η -karbida to je veća i otpornost trošenju, što je vidljivo iz dijagrama na slici 22. Odabirom parametara toplinske obrade se utječe na udio η -karbida u duboko hlađenom čeliku.



Slika 23. Utjecaj vremena držanja na količinu η -karbida različite temperature austenitizacije [17]

Iz dijagrama na slici 23 vidljivo je kako dužim držanjem na temperaturi dubokog hlađenja raste količina η -karbida. Treba se uočiti kako je taj porast količine značajan do 25 sati držanja, a nakon 25 sati nije od velikog značaja. Iz tog razloga se čelici ne drže duže od 25 sati na temperaturi dubokog hlađenja. Isto tako se iz dijagrama može zaključiti da se višom temperature austenitizacije znatno smanjuje količina η -karbida. [17]



Slika 24. Erozijska otpornost čelik PM S390 MC [2]

Dijagram na slici 24 prikazuje kako temperatura austenitizacije nema značajan utjecaj na erozijsku otpornost trošenju, već kombinacija toplinske obrade. Vidljivo je iz dijagrama kako su duboko hlađeni brzorezni čelik ima veću erozijsku otpornost od onoga koji je kaljen i trostruko popušten. Duboko hlađeni brzorezni čelik ima istu lomnu žilavost kao i čelik koji je prošao konvencionalnu toplinsku obradu, manju udarnu čvrstoću i nešto malo veću tvrdoću, ali zato pokazuju znatno veću otpornost na erozijsko trošenje. Pošto nema suštinske razlike u fazama ova dva postupka, te uzimajući u obzir da mikrostruktura ima presudan utjecaj na trošenje, čini se da je viša otpornost trošenju proizašla iz prisutnosti η karbida dobivenih dubokim hlađenjem. [2]

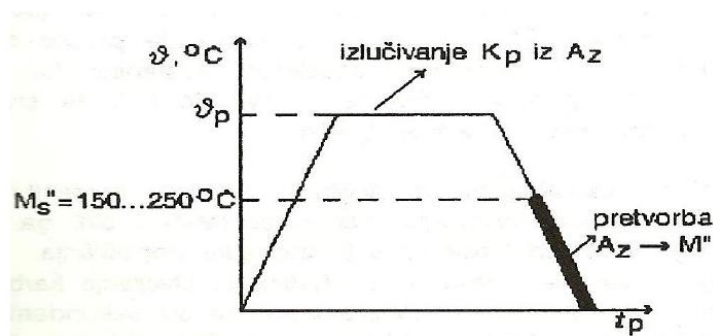
3.2.4. Popuštanje

Popuštanje je proces ugrijavanja kaljenog čelika na temperaturu ispod A_1 u svrhu postizanja povišenja žilavosti martenzita, redukcije zaostalih naprezanja i postizanja dimenzijske postojanosti. U općenitom slučaju struktura brzoreznog čelika u kaljenom stanju

sastoji se od martentiza (M'), zaostalog austenita (A_z), sekundarnog karbida i eutektičkih karbida u udjelima kao u izrazu:

$$\underbrace{M'}_{50-70\%} + \underbrace{A_z}_{20-40\%} + \underbrace{K'' + K^e}_{\approx 10\%}$$

U ovom stanju je čelik tvrd, pun zaostalih napreznja, krhak i dimenzijski nestabilan. Kako bi brzorezni čelik bio tehnički primjenjiv treba ga popuštati. [14, 15]



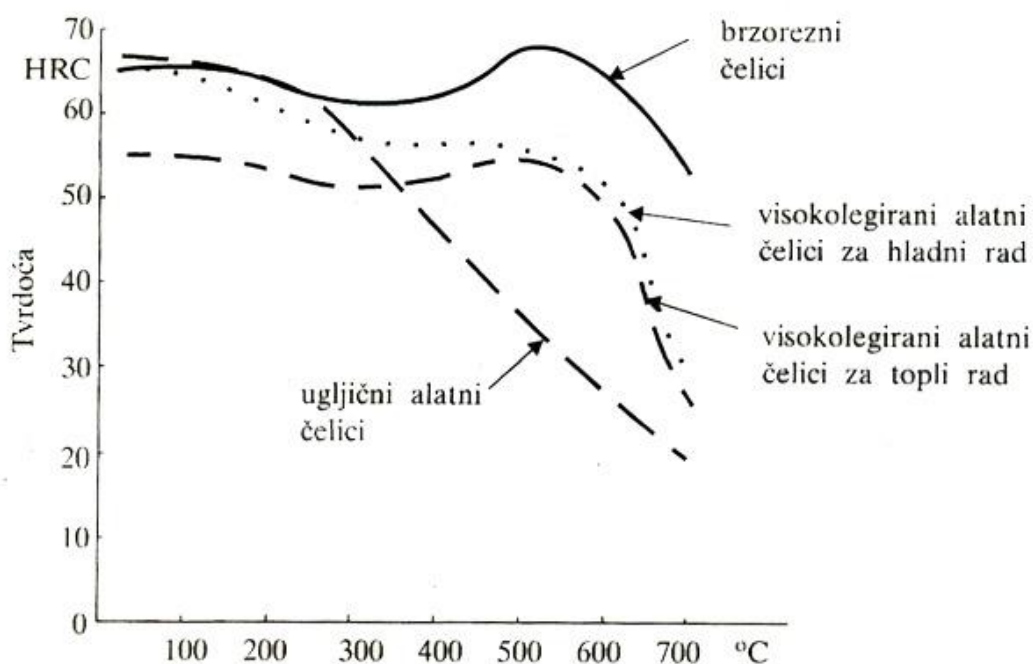
Slika 25. Dijagram postupka popuštanja čelika s naznačenim slijedom pojava [14]

Na slici 25 je prikazan postupak popuštanja brzoreznog čelika. Proces kod popuštanja brzoreznog čelika sastoji se od četiri stadija.

- U I. stadiju (do 270°C) raspada se primarni martenzit i izlučuje se prijelazni ϵ karbid ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$). Smanjuju se zaostala napreznja u martenzitu, a udio ugljika snižava na oko 0,25% C. Isto tako se snižavaju volumen i tvrdoća (za 2 do 4 HRc)
- U II. stadiju popuštanja (od 270 do $450 ^\circ\text{C}$) najprije nastaje ϵ karbid, koji u istom ovom stadiju ili otapa u martenzitu ili oblik Fe_3C . Pri višim temperaturama ovog stadija (kroz jedan sat) počinje intenzivno otapanje Fe_3C u martenzitu. Volumen se i dalje snižava.
- U III. stadiju mali udio zaostalog austenita (A_z) se pretvara u bainit (B) pri temperaturama između 300 i 400°C . Pri ovoj reakciji volumen alata raste. Martenzit i dalje osiromašuje ugljikom i dolazi do stvaranja ferita.
- u IV. stadiju na temperaturi između 450 i $480 ^\circ\text{C}$ intenzivno se otapa Fe_3C u martenzitu, a iznad 480°C pa sve do 600°C počinje proces destabilizacije A_z , tj. dolazi do izlučivanja legirajućih elemenata (V, W, Mo i C) te stvaranja karbida popuštanja. Ovom pojavom se destabilizira A_z , te mu se povisuje temperatura početka stvaranja martenzita (M''_s) i čini ga sposobnijim za pretvorbu $A_z \rightarrow M''$. Ovim dvjema pojavama nastanka K^p i M'' dolazi do porasta tvrdoće čelika koja se naziva

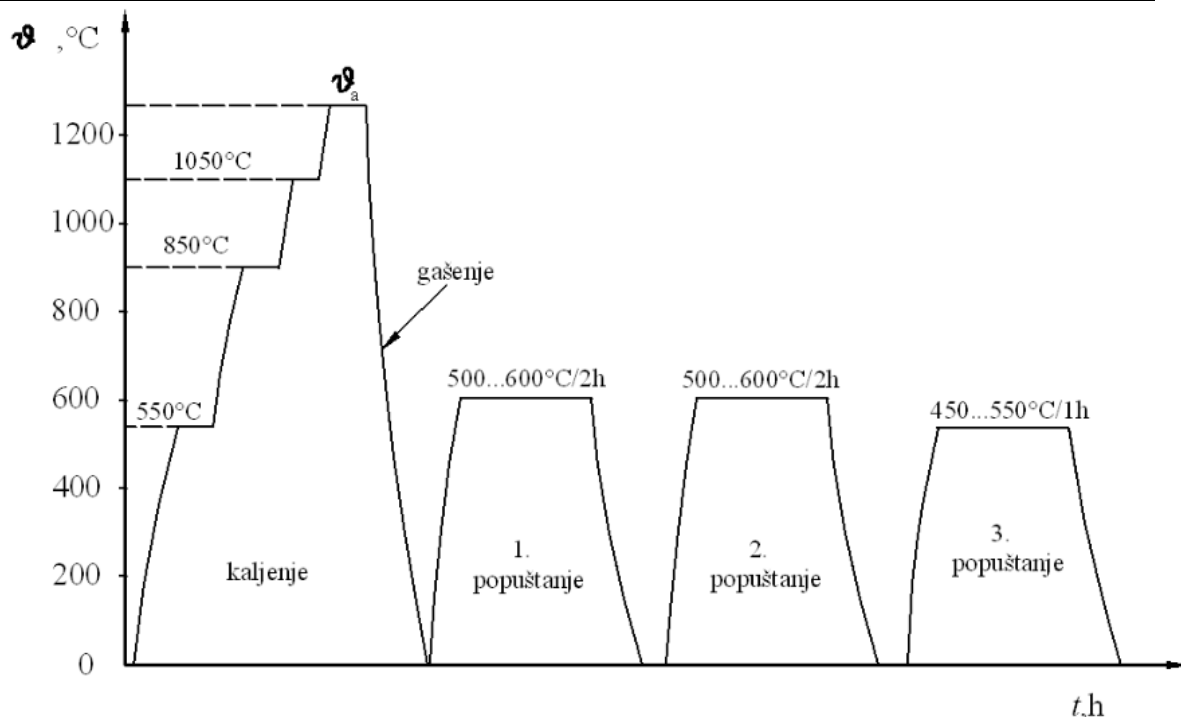
sekundarno otvrdnuće (slika 26). Ako se temperatura povisi iznad 600°C onda dolazi do nastanka karbida tipa $M_{23}C_6$ koji su skloni koalescenciji, a time se uzrokuje drastični pad tvrdoće i gubitak svojstva popuštenog martenzita željezne matrice, te približavanju meko žarenoj strukturi. Iz tog razloga brzorezni čelici ne smiju se popuštati na temperaturama višim od 600°C.

- Popuštanje pri temperaturi nešto manjoj od 700°C primjenjuje se umjesto mekog žarenja u slučaju alata kojem će se daljnjom obradom želi načiniti finija oštrica u svrhu preciznog rezanja. [14, 15]



Slika 26. Krivulja popuštanja brzoreznog čelika u odnosu na ostale čelike [15]

Na slici 27 je prikazan dijagram kaljenja i popuštanja brzoreznog čelika. Iz dijagrama se vidi da se popuštanje provodi tri puta. U prvom popuštanju se čelik obrađuje na maksimalnu sekundarnu tvrdoću. Činjenica je da u prvom stadiju nije sav zaostali austenit transformirao, te da novonastali sekundarni martenzit nije popušten. Radi toga se provodi drugo popuštanje koje potpuno pretvara zaostali austenit u martenzit, a treće popuštanje u svrhu reduciranja napetosti prethodnih popuštanja. [14]



Slika 27. Dijagram postupka kaljenja i popuštanja brzoreznog čelika [14]

3.3. Nitiranje

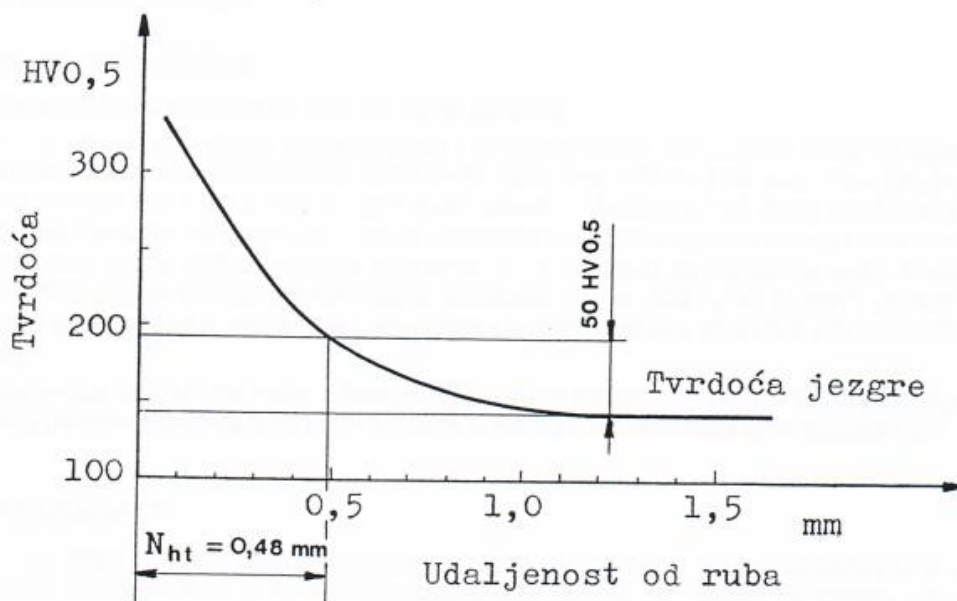
Nitiranje je toplinsko-kemijski postupak pri kojem u površinu čelika difundira dušik i dolazi do stvaranja nitrida, dubina do 0,6 mm. Ovim postupkom se čeliku poboljšavaju svojstva, prvenstveno otpornost na trošenje. U zavisnosti o koncentraciji dušika mogu nastati različiti tipovi nitrida.

Mogući nitridi koji mogu nastati su γ' , ϵ i ξ . Prva dva γ' i ϵ nitrida su za tehniku nitiranja od bitnog značenja, dok je ξ nitrid beznačajan. Kod legirajućih elemenata treba voditi računa da i oni s dušikom tvore nitride ili karbide.

Nitiranjem se povećava otpornost prema trošenju, tvrdoća i dinamička izdržljivost, te su dijelovi postojani prema višim temperaturama (500-550 °C). Isto tako nitiranjem se povećava korozijska otpornost, dok se žilavost nitrianih obradaka se smanjuje. Nitiranje se može provoditi u plinu, u solnim kupkama i plazmom.



400:1; Nagriženo s 3% nitalom



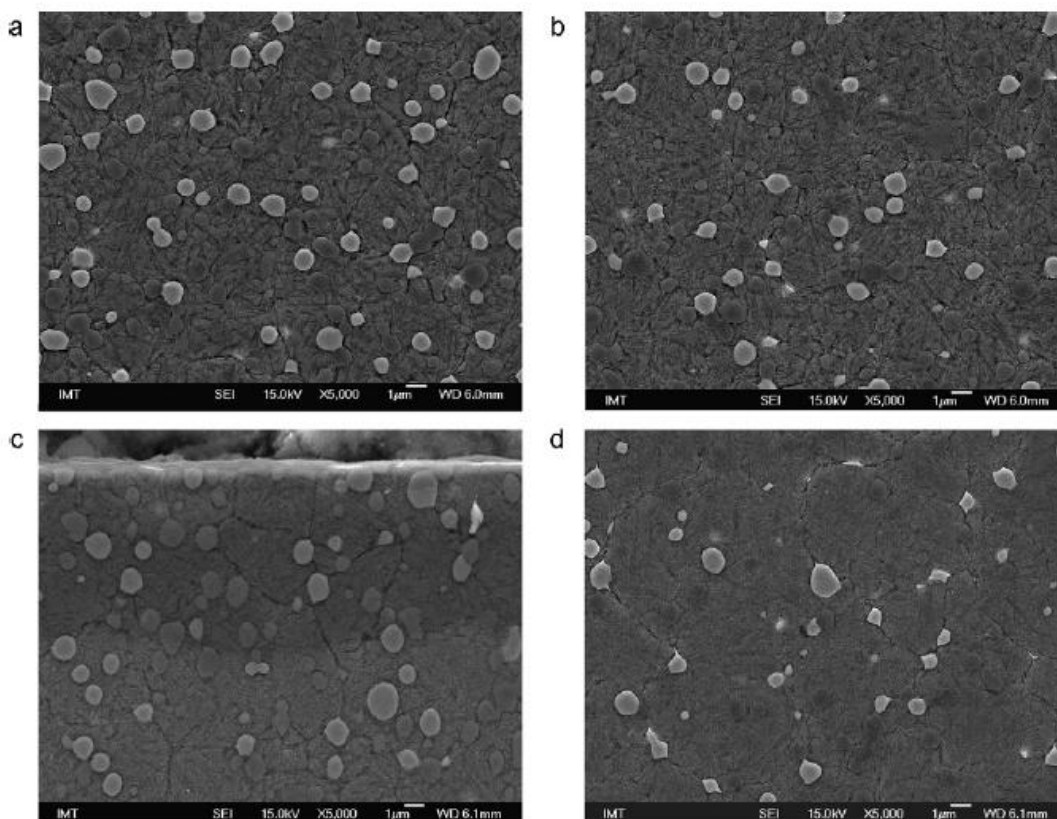
Slika 28. Mikrostruktura i raspodjela tvrdoće na nitriranom uzorku Č1220 [18]

Slika 28 prikazuje čelik Č1220 nakon nitriranja Tenifer postupkom. Vidljivo je kako kroz difuzijski sloj u smjeru prema površini tvrdoća značajno raste.

Nitriranje u plinu se dijeli na dvije vrste ovisno o plinu u kojem se upotrebljava, stoga postoje nitriranje u samo disociranom amonijaku i nitriranje u amonijaku s dodatkom drugog plina (npr.: CO_2 , CO , O_2 , endo ili egzo plin). U slučaju nitriranja samo u amonijaku dobiva se zona spojeva pretežno načinjena od γ' -nitrida koja je vrlo krhka i tvrda, te se ona mora skinuti s brušenjem prije nego li obradak ode u eksploataciju. Ovim postupkom se postižu velike dubine nitriranja ali postupak traje po nekoliko desetaka sati. U slučaju nitriranja amonijakom i još nekim plinom, moguće je dobiti zonu spojeva koja se sastoji od γ' i ϵ nitrida, a variranjem količine i vrste dodatnih plinova moguće je proizvesti bez zone spojeva. U navedenim postupcima osim dušika, površinu čelika difudiraju i kisik i ugljik, a provode se pri temperaturi od $570\text{ }^\circ\text{C}$.

Nitriranje u solnim kupkama se navodi Tenifer postupak, koji se provodi kupkama koje sadržavaju odgovarajuće soli pri 570 do 580°C, a tokom rada se kontrolira sastav cijanida, cijanata i željeza. Za vrijeme čitavog procesa nitriranja u kupku se upuhuje zrak u cilju održavanja potrebnog omjera cijanida i cijanata. Zona postupka nakon nitriranja Tenifer postupkom se pretežno sastoji od ϵ -nitrida i izvanredno je otporna na adhezijsko trošenje. [14,18]

Plazma nitriranje je proces koji se odvija na temperaturama 50 do 100°C manjim nego plinsko nitriranje, što je važno za izbjegavanje deformacija dijelova kompleksne geometrije i strogih dimenzijskih zahtjeva. Kontrolom sastava plinske plazme i temperature površine koja se nitrira moguće je izbjeći stvaranje zona spojeva, što je iznimno važna kod udarnih opterećenja i toplinskih šokova. Ionsko bombardiranje u vakuumu tokom ovog procesa nitriranja, formiranom nitridu daje i izvanredna tribološka svojstva. [19]



Slika 29. Mikrostruktura uzoraka brzoreznih čelika S390: a) austenitiziran i trostruko popušten; b) duboko hlađen i popušten; c) duboko hlađen, popušten i nitriran; d) austenitiziran na višoj temperaturi i trostruko popušten [1]

Na slici 29 su prikazane mikrostrukture uzoraka brzoreznog čelika S390. Nakon austenitizacije u vakumskoj peći i trostrukog popuštanja, vidljivo je kako su se eutektički karbidi izlučili uz granicu zrna (slika 29 a). Dubokim hlađenjem i popuštanjem istog čelika

poprima se sličan oblik sa popuštenim martenzitom i finim kuglastim neotopljenim eutektnim karbidom (slika 29 b). No, dužim trajanjem dubokog hlađenja navedenog čelika, dobiva se finija mikrostruktura i veća tvrdoća. Kombinacijom plazma nitriranja i dubokog hlađenja čelika S390 nastaje difuzijski sloj na površini dubine $65 \mu m$ (slika 29 c). Isto tako se nitriranjem povećava tvrdoća površine, ali nema učinak i na povećanje tvrdoće ispod zone difuzijskog sloja. Povećanjem temperature austenitizacije dobiva se fina martenzitna struktura kao i kod ostalih uzoraka, ali bez izlučenih predeutektnih karbida duž granice austenitnog zrna i ravnomjerna raspodjela neotopljenih karbida (slika 29 d). Usporedi li se mikrostrukutra uzorka sa slike 29 d s ostalima, vidljivo je kako se povećanjem temperature austenitizacije smanjuje udio neotopljenog eutektnog karbida, smanjujući tvrde faze volumena u mekoj matrici, što može uzrokovati njegovo povećanje trošenja.

U drugu ruku primjenom dubokog hlađenja dobivena slična mikrostruktura, gdje se sav zaostali austenit pretvori u martenzit, nema značajne promjene faktor trenja i stupnja trošenja. Dužim periodom dubokog hlađenja, formira se fina igličasta mikrostruktura martenzita koja ima manji faktor trenje i veću otpornost trošenju. No, ta razlika je manja od 10% u usporedbi s klasično kaljenim i triput popuštanim uzorcima. S druge strane gledano, primjenom plazma nitriranja brzoreznog čelika S390 P/M faktor trenja i trošenje se znatno smanjuju. U usporedbi s uzorcima koji nisu nitrirani, plazma nitriranje brzoreznog čelika S390 P/M smanjuje negativni učinak koji imaju visoke temperature austenitizacije na trenje i trošenje. [1]

4. Eksperimentalni dio

Na brzoreznom čeliku S 390 MC provedena su tribološka ispitivanja trošenja erozijom, sa ciljem da se vidi kakav učinak ima duboko hlađenje na erozijsku otpornost i da li se kombinacijom dubokog hlađenja i nitriranjem u plazmi može značajno poboljšati erozijska otpornost.

4.1. Ispitivani materijal

Ispitivani materijal je brzorezni čelik tvrtke Böhler čiji je kemijski sastav prikazan tablicom 5.

Tablica 2. Kemijski sastav brzoreznog čelika S390 MC (Böhler) [20]

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%W	%Co	%Fe
1,64	0,60	0,30	4,80	2,00	4,80	10,40	8,00	ostalo

Uzorci su isporučeni u obliku pločica dimenzija 18x18x10 mm. A podijeljeni su u četiri skupine prema toplinskim obradama koje su prošli (tablica 6)

Tablica 3. Toplinski parametri brzoreznog čelika S390 MC (Böhler) [20]

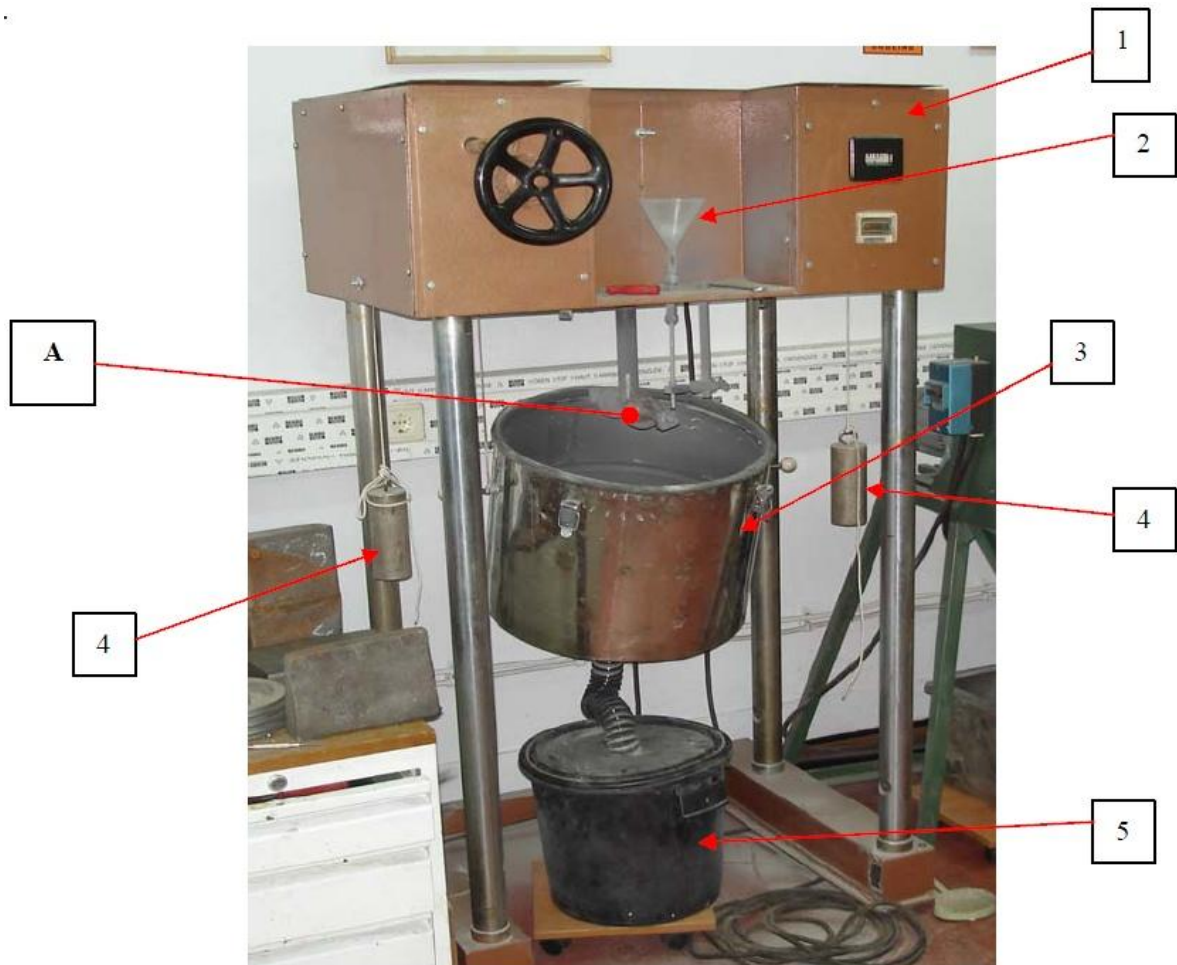
Oznaka uzorka	Austenitizacija °C/min	Duboko hlađenje °C/h	Popuštanje °C/h	Nitriranje °C/h
P0	1130/6	-	520/520/490/2h	-
P1	1130/6	-	520/520/490/2h	490/2,5
DH0	1130/6	-196/24	520/2h	-
DH1	1130/6	-196/24	520/2h	490/2,5

4.2. Tribološko ispitivanje erozijskog trošenja

Ispitivanje erozijskog trošenja navedenog materijala provedeno je u laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Uzorci su bili ispitivani uređajem za ispitivanje na eroziju prikazan na slici 30. Uređaj ima dva nosača u koje se učvršćuju uzorci, što omogućuje da se dva uzorka ispituju istovremeno. Na nosačima je moguće podešavati kut udara čestice o površinu uzorka. Nakon

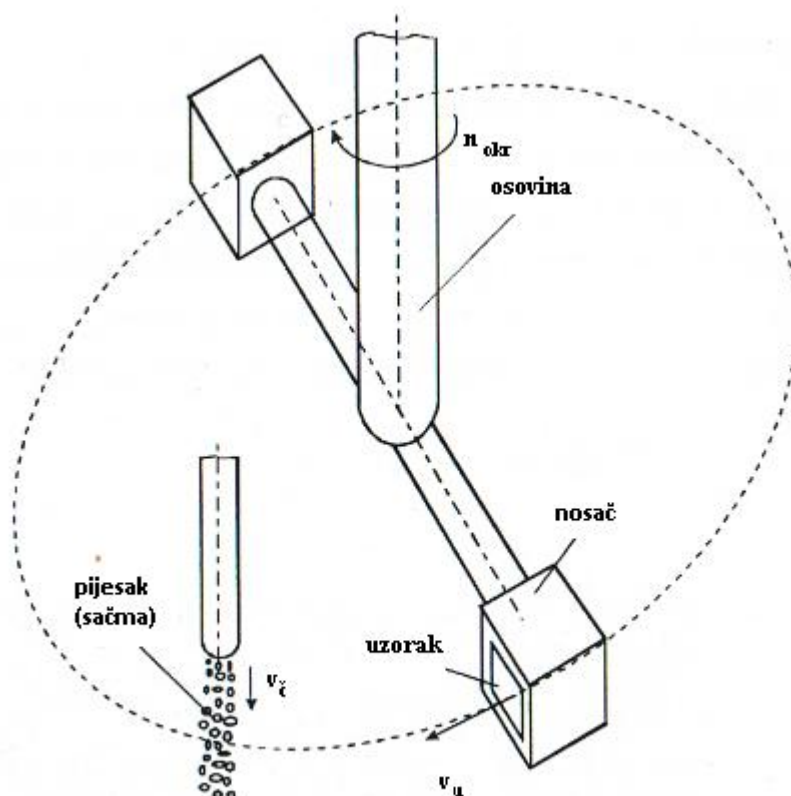
učvršćivanja uzoraka i podešavanja kuta pod kojim će erodent udarati o površinu, zaštitni bubanj se diže i osigurava, nakon čega se u lijevak sipa erodent, a zatim se uključuje stroj.



Slika 30. Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama [6]

Osnovni elementi stroja za ispitivanje otpornosti na eroziju, prema slici 30 su:

- 1- Kućište elektromotora sa prekidačima,
- 2- Lijevak za dovod erodenta,
- 3- Zaštitni bubanj sa odvodom za erodent,
- 4- Utezi za pridržavanje bubnja,
- 5- Spremnik u koji se odvodi već korišteni erodent

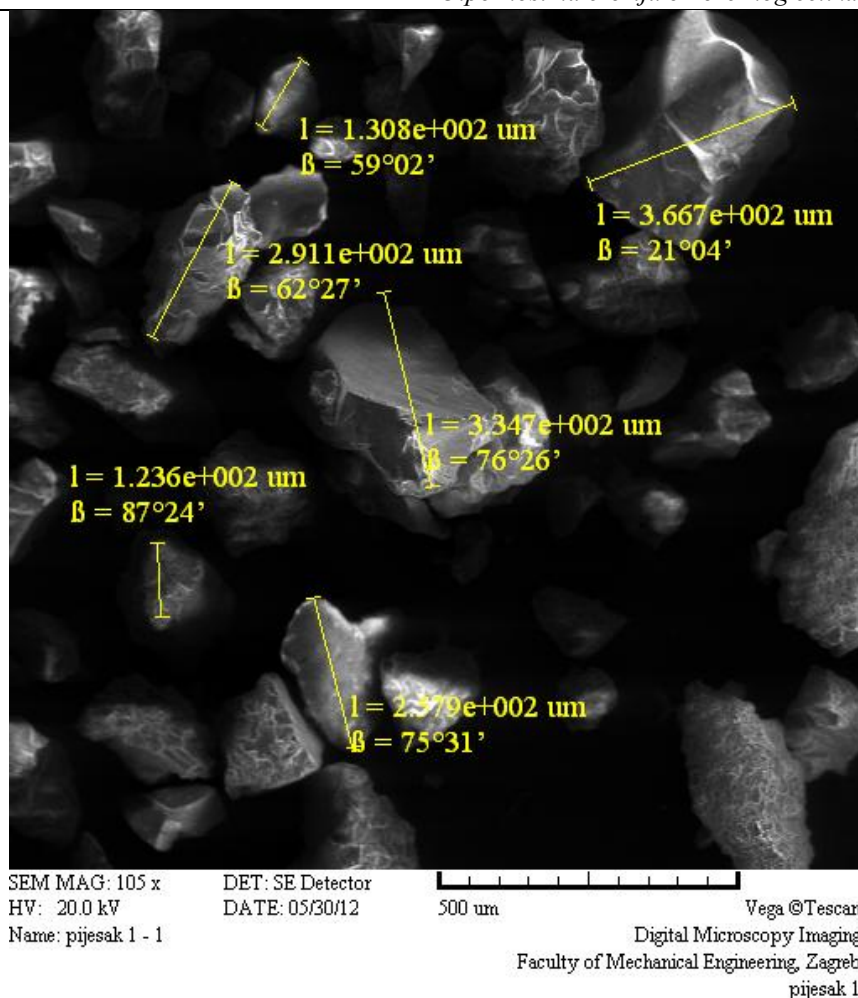


Slika 31. Detalj A sa slike 30. [6]

Iz detalja A sa slike 31 je vidljivo odvijanje procesa ispitivanja erozijskog trošenja. Uzorci pričvršćeni u hvataljkama se rotiraju brzinom v_u oko osi osovine. Nosači vode uzorke kroz mlaz erodenta koji gravitacijski pada brzinom v_c , čime se imitira pojava udaranja čestice o površinu i dolazi do erozijskog trošenja materijala. Proces se odvija u nekom vremenskom intervalu, nakon čega se stroj isključuje i uzorci vade iz hvataljki nosača.

Prije ispitivanja uzorci se prvo važu na preciznoj vagi, a nakon ispitivanja se uzorci čiste kako bi se odstranile čestice erodenta i ostalih nečistoća s površine uzorka, nakon čega slijedi ponovno vaganje.

U ovom radu su uzorci prolazili erozijsko trošenje pijeskom i sačmom, pod kutovima od 90° i 30° za obje vrste erodenta. Svaki uzorak je bio izložen erozijskom trošenju u trajanju od 1 sat, koji je podijeljen u četiri ciklusa u trajanju od 15 minuta. Na kraju svakog ciklusa uzorci su očišćeni i vagani, a rezultati su predstavljeni u izgubljenoj masi koja je proizašla iz erozijskog trošenja.



Slika 32. Zrnca pijeska snimljena pretražnim elektronskim mikroskopom

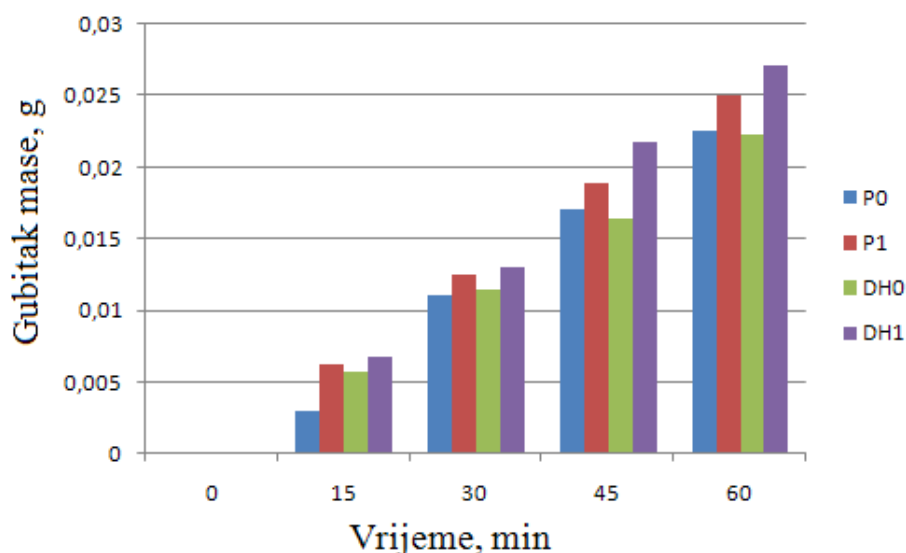
Kao što je prikazano na slici 32 čestice pijeska imaju oštre rubove koji udaranjem o površinu režu materijal, za razliku od čelične sačme koja je u obliku kuglica promjera 0,1 mm i udaranjem o površinu uzrokuje inicijalnu pukotinu po granicama zrna. Tako se može zaključiti da se čestice pijeska se svrstavaju u čestice nepravilnog oblika, dok čelične sačmene kuglice predstavljaju čestice pravilnog oblik, i može se zaključiti da će erozijsko trošenje pijeskom biti veće nego sa sačmenim kuglicama što predočava i dijagram na slici 10.

4.3. Rezultati ispitivanja

Rezultati erozijskog trošenja svakog uzorka prikazani su tablično, a srednja vrijednost pojedine vrste uzorka je prikazana u obliku dijagrama za pojedinu vrstu erodenta i kuta pod kojim su čestice erodenta upadale.

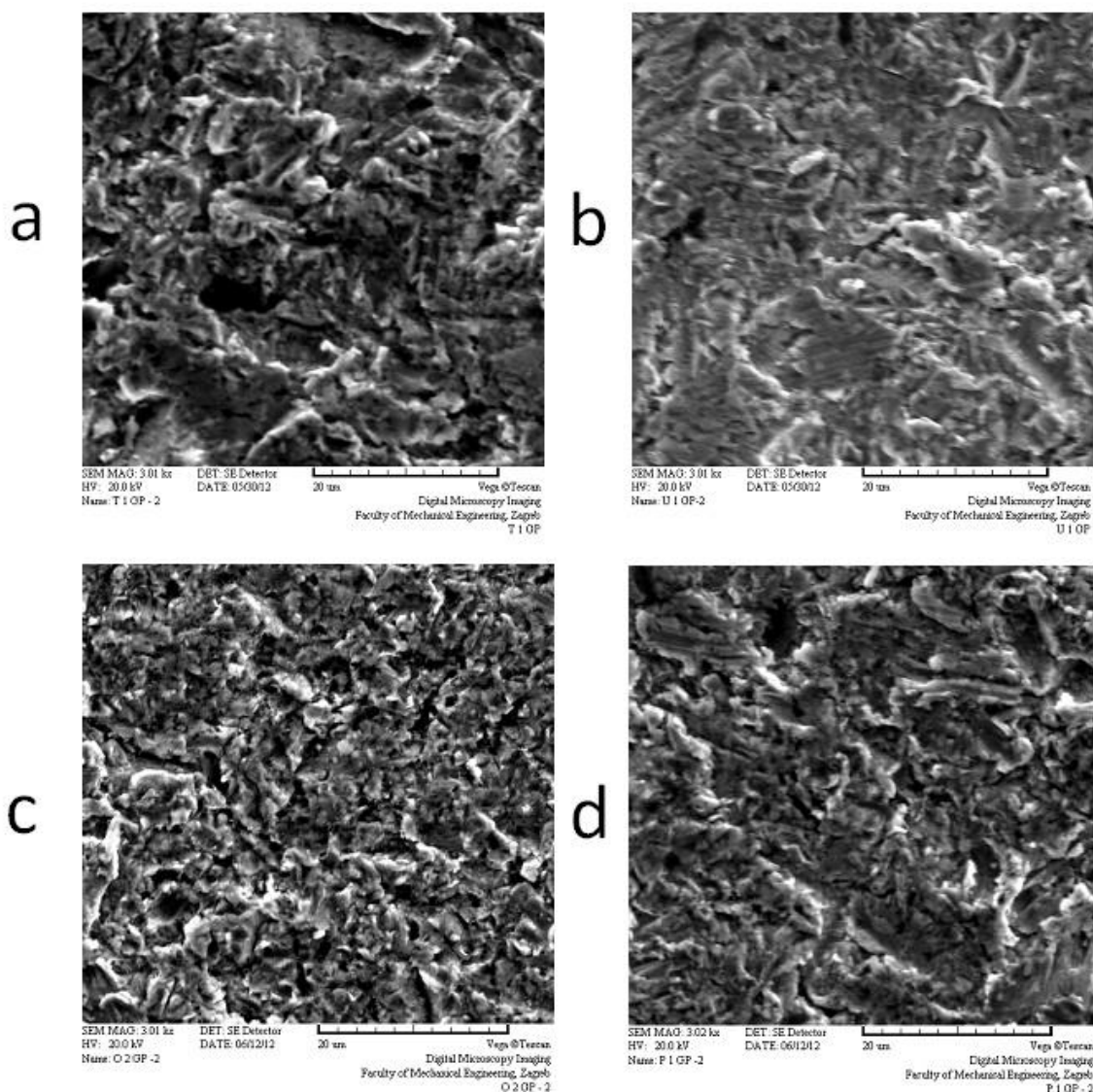
Erozijsko trošenje pijeskom pod kutom od 90°**Tablica 4. Erozijsko trošenje pijeskom pod kutom od 90° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)**

Uzorak	Izgubljena masa u g			
	15 min	30 min	45 min	60 min
P0-1	0,0047	0,0099	0,0165	0,0216
P0-2	0,0013	0,0124	0,0177	0,0236
P0-SR	0,003	0,01115	0,0171	0,0226
P1-1	0,0058	0,0115	0,0173	0,0226
P1-2	0,0069	0,0138	0,0207	0,0275
P1-SR	0,00635	0,0126	0,019	0,02505
DH0-1	0,0054	0,0107	0,0152	0,0214
DH0-2	0,006	0,0123	0,0179	0,0234
DH0-SR	0,0057	0,0115	0,01655	0,0224
DH1-1	0,0062	0,0117	0,0218	0,0261
DH1-2	0,0073	0,0144	0,022	0,081
DH1-SR	0,00675	0,01305	0,0219	0,0271

**Slika 33. Dijagram erozijskog trošenja pijeskom za kut 90°**

Iz tablice 4 vidljivo je kako je razlika vrijednosti trošenja dvaju P0 uzorka velika, što je posljedica nakupljanja pijeska na rubu uzoraka, a na uzorku P0-2 u prvom ciklusu se nakupilo više pijeska i tako štitilo taj dio uzorak od daljnjeg trošenja. Ali nakon nekoliko ciklusa ta

razlika se manjila. Kod drugih uzoraka ta razlika nije toliko velika. Srednje vrijednosti su dijagramski prikazane na slici 33 i može se uočiti kako su nitrirani uzorci P1 i DH1 pokazali najslabiju otpornost erozijskom trošenju pijeskom pod kutom od 90° . S tim da je duboko hladeni uzorak DH1 je pokazao slabiju otpornost trošenju. Razlog tomu je krhki nitrirani sloj na površini uzorka koji je podložniji udarnoj eroziji.



Slika 34. Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja pijeskom pod kutom od 90° snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom a) P0; b) P1; c) DH0; d) DH1

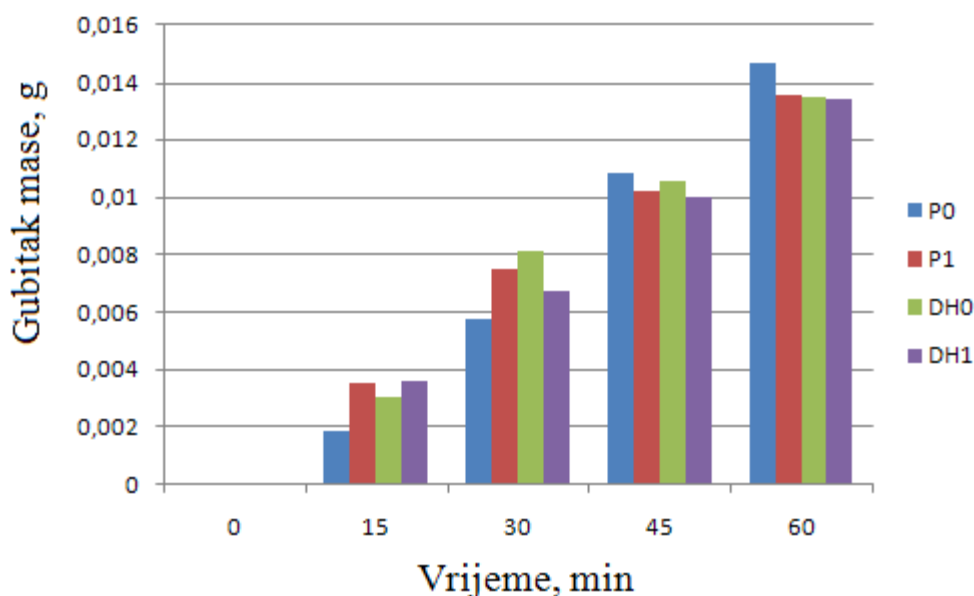
Iz slike 34 vidi se kako su ovim procesom trošenja zrna pijeska izbijala materijal iz površina uzoraka, i oštećenje je nastalo u obliku kratera. Kod uzorka DH1 nastala je najgrublja površina, te se može zaključiti da udaranjem čestica pijeska o površinu se više

materijala iz bilo iz površine nego kod ostalih uzoraka, što se može vidjeti i na dijagramu trošenja (slika 33).

Erozijsko trošenje pijeskom pod kutom od 30°

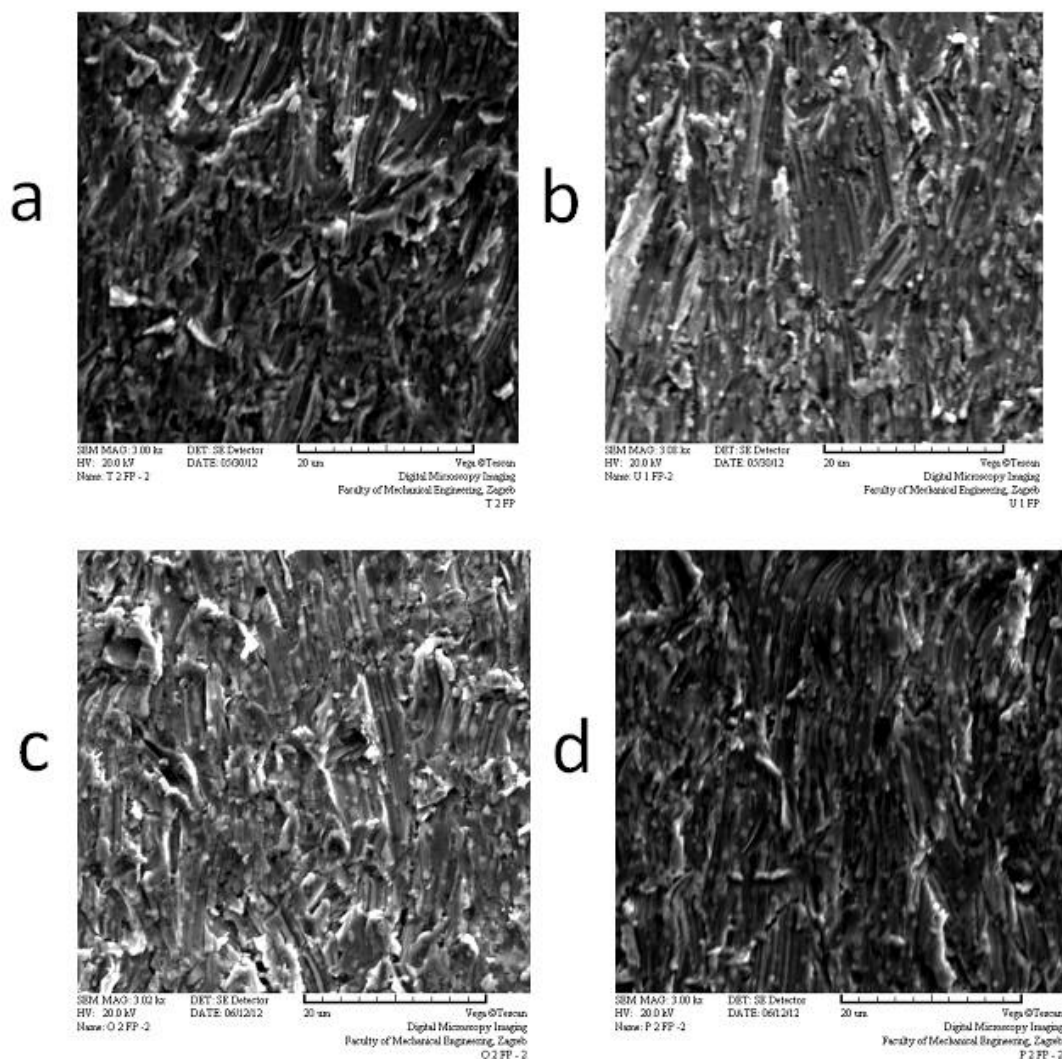
Tablica 5. Erozijsko trošenje pijeskom pod kutom od 30° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)

Uzorak	Izgubljena masa			
	15 min	30 min	45 min	60 min
P0-1	0,0025	0,0061	0,0101	0,015
P0-2	0,0013	0,0055	0,0117	0,0143
P0-SR	0,0019	0,0058	0,0109	0,01465
P1-1	0,003	0,0062	0,0089	0,0123
P1-2	0,0041	0,0089	0,0116	0,0123
P1-SR	0,00355	0,00755	0,01025	0,01365
DH0-1	0,0026	0,0072	0,0095	0,0121
DH0-2	0,0036	0,0091	0,0117	0,015
DH0-SR	0,0031	0,00815	0,0106	0,01355
DH1-1	0,0032	0,0064	0,0095	0,013
DH1-2	0,004	0,0071	0,0106	0,014
DH1-SR	0,0036	0,00675	0,01005	0,0135



Slika 35. Dijagram erozijskog trošenja pijeskom za kut 30°

Iz tablice 5 vidljiva je slična pojava razlike u gubitku mase kod dvaju istih uzoraka. S tim da u ovom ispitivanju ta razlika je blaža jer su hvataljke bile u takvom položaju da se je manje pijeska za vrijeme procesa nakupljalo uz rub uzorka. Dijagramskim prikazom, vidljivo je da ta pojava ima značajan utjecaj na prikaz rezultata. Vidljivo je kako prosječan gubitak mase P0 uzorka u prvom ciklusu je manji od ostalih uzoraka. U daljnjim ciklusima ta razlika je manja i ima puno manji utjecaj na srednju vrijednost trošenja. U trećem ciklusu vidljivo je kako trošenje uzorka P0 poprima najveću vrijednost trošenja, dok je u četvrtom ciklusu razlika trošenja P0 uzorka naspram ostalih još veća, dok se kod uzorka DH0 smanjila. Gledajući tablicu 5 vidi se da je pojava nakupljanja pijeska na jednom od DH0 uzoraka imala utjecaj na smanjenje srednje vrijednosti trošenja u četvrtom ciklusu. Ako se pažljivo prouče rezultati iz tablice 5 i prikazi iz dijagrama sa slike 35, može se zaključiti da su ovakvim uvjetima trošenja podložniji uzorci koji nisu nitrirani, naročito uzorci koji su prošli konvencionalnu toplinsku obradu. Razlog većem trošenju ne nitriranih uzorka je manja tvrdoća površine od nitriranih uzoraka, što i ima značajan utjecaj kod abrazivne erozije.

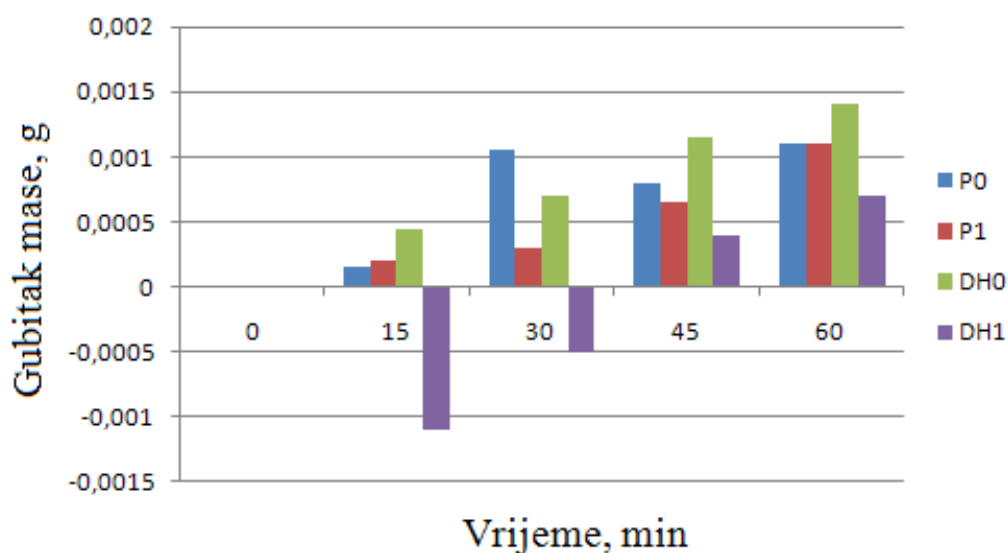


Slika 36. Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja pijeskom pod kutom od 30° snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom a) P0; b) P1; c) DH0; d) DH1

Na slici 36 je prikazana površina uzoraka nakon izlaganja abrazivnoj eroziji pijeskom. Vidljivo je kako su čestice pijeska klizile po površini i izazvale efekt oranja svojim oštrim rubovima, te nakon prekida kontakta s površinom odrezale nastali srh. Trošenjem pijeskom pod kutom 30° proizašlo je oštećenje površine u obliku linijskih udubina, koje istovremeno predstavljaju putanju čestice.

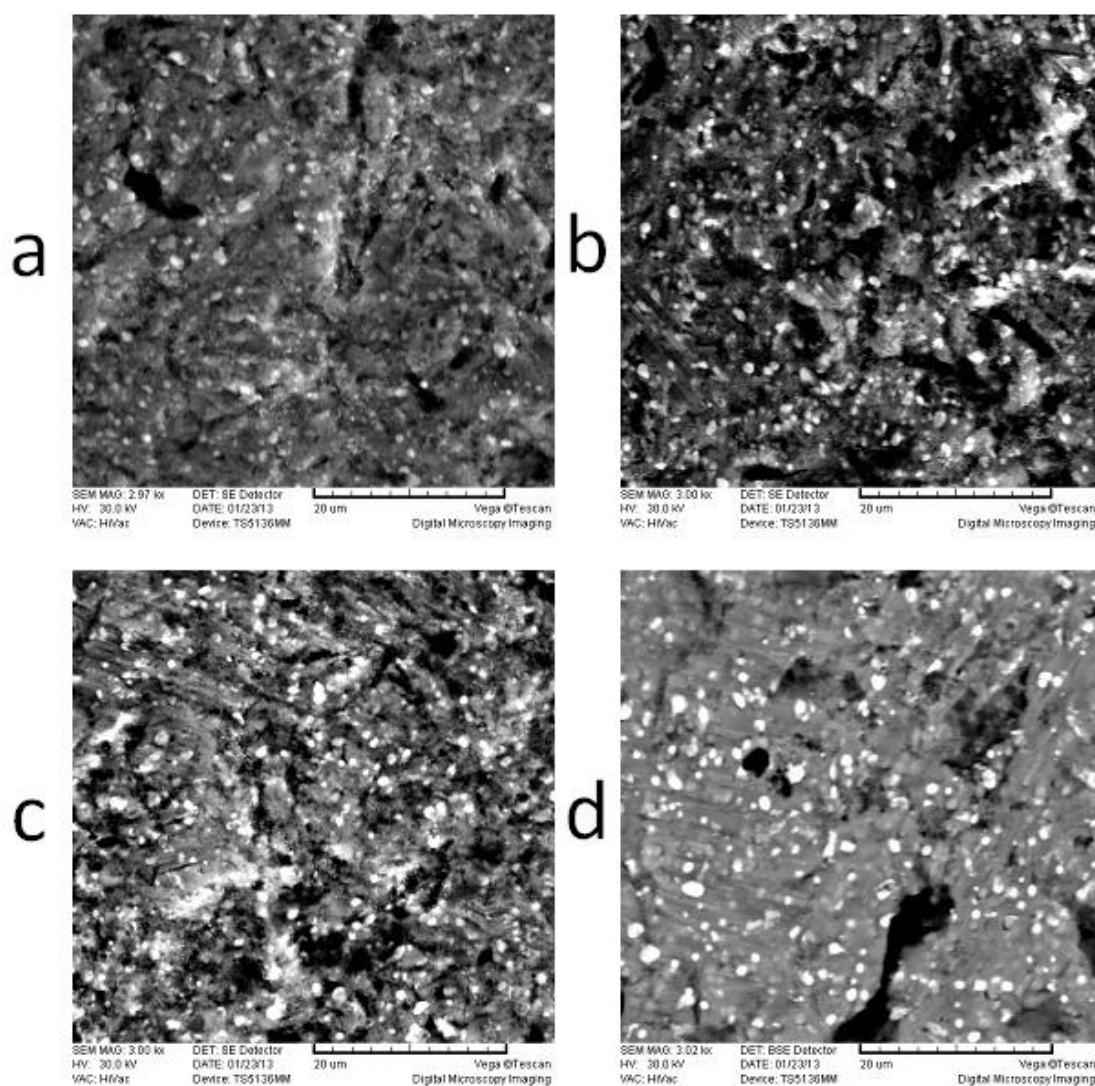
Erozijsko trošenje čeličnom sačmom pod kutom od 90°**Tablica 6. Erozijsko trošenje čeličnom sačmom pod kutom od 90° brzoreznog čelika S390 MC (Böhler)**

Uzorak	Izgubljena masa			
	15 min	30 min	45 min	60 min
P0-1	0,0001	0,0007	0,0014	0,0018
P0-2	0,0002	0,0014	0,0002	0,0004
P0-SR	0,00015	0,00105	0,0008	0,0011
P1-1	0,0003	0,0005	0,0009	0,0012
P1-2	0,0001	0,0001	0,0004	0,001
P1-SR	0,0002	0,0003	0,00065	0,0011
DH0-1	0,0002	0,0006	0,0010	0,0012
DH0-2	0,0007	0,0008	0,0013	0,0016
DH0-SR	0,00045	0,0007	0,00115	0,0014
DH1-1	-0,0007	0	0,0003	0,0011
DH1-2	-0,0015	-0,001	0,0005	0,0003
DH1-SR	-0,0011	-0,00005	0,0004	0,0007

**Slika 37. Dijagram erozijskog trošenja čeličnom sačmom za kut 90°**

Iz tablice 6 prva očita stvar koja odskoče od cjeline jest pojava da se uzorku DH1 povećava masa usred izlaganja eroziji čeličnim kuglicama. Uzrok ove pojavi leži u

sposobnosti čeličnih kuglica sačme da u površinu uzorka opetovanim udarima utisnu nečistoće prisutne u bubnju (npr. pijesak). Tek u trećem ciklusu je ta pojava nestala. Ista pojava se pojavila i kod uzorka P0 ali u trećem i četvrtom ciklusu, samo što dobivena masa nije poprimila vrijednost veću od početka ispitivanja, no imala je značajan utjecaj na srednju vrijednost trošenja. Iz dijagrama sa slike 37 i tablice 6 vidi se kako su pri ovom režimu erozijskog trošenja najviše mase izgubili uzorci koji nisu nitrirani, pogotovo DH0. Isto tako uspoređi li se erozijsko trošenje čeličnom sačmom i pijeskom, može se uočiti kako je trošenje sačmom puno manje glede gubitka mase. Razlog tome je to što trošenje ovim erodentom najviše pridonosi plastičnoj deformaciji površine i posljedičnom njenom dodatnom očvrscnuću.



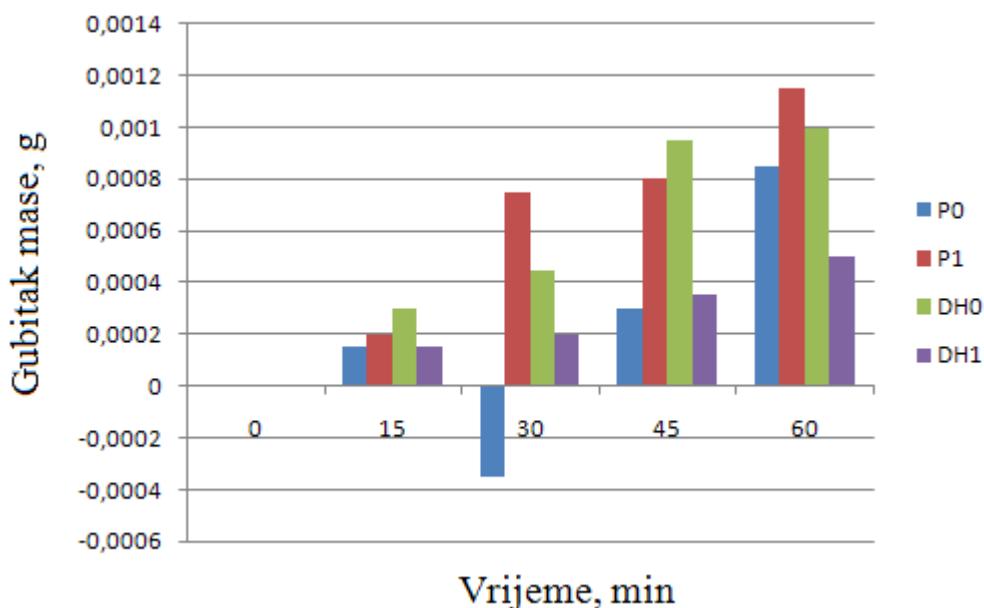
Slika 38. Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja čeličnom sačmom pod kutom od 90° snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom a) P0; b) P1; c) DH0; d) DH1

Iz slike 38 može se vidjeti kako trošena površina nije toliko gruba kako je slučaj kod one trošene pijeskom. Razlog tome je što energija prenesena na površinu pridonijela plastičnoj deformaciji. Iz slike se vidi kako uzorak DH1 ima najmanje dubine, razlog tomu je što se najmanje trošio a i time se najmanje deformirao, za što je bio zahvalan tvrdi nitirani sloj na površini ovog uzorka. Isto tako mora se napomenuti da su uzorci koji su prošli erozijsko trošenje sačmom prethodno prošli erozijsko trošenje pijeskom. Pojedine udubine su vrlo vjerojatno u sebi i sadržavale komadiće prašine i pijeska iz bubnja pa ih nije bilo moguće ukloniti, što je pridonijelo povećanju mase uzorka.

Erozijsko trošenje čeličnom sačmom pod kutom od 30°

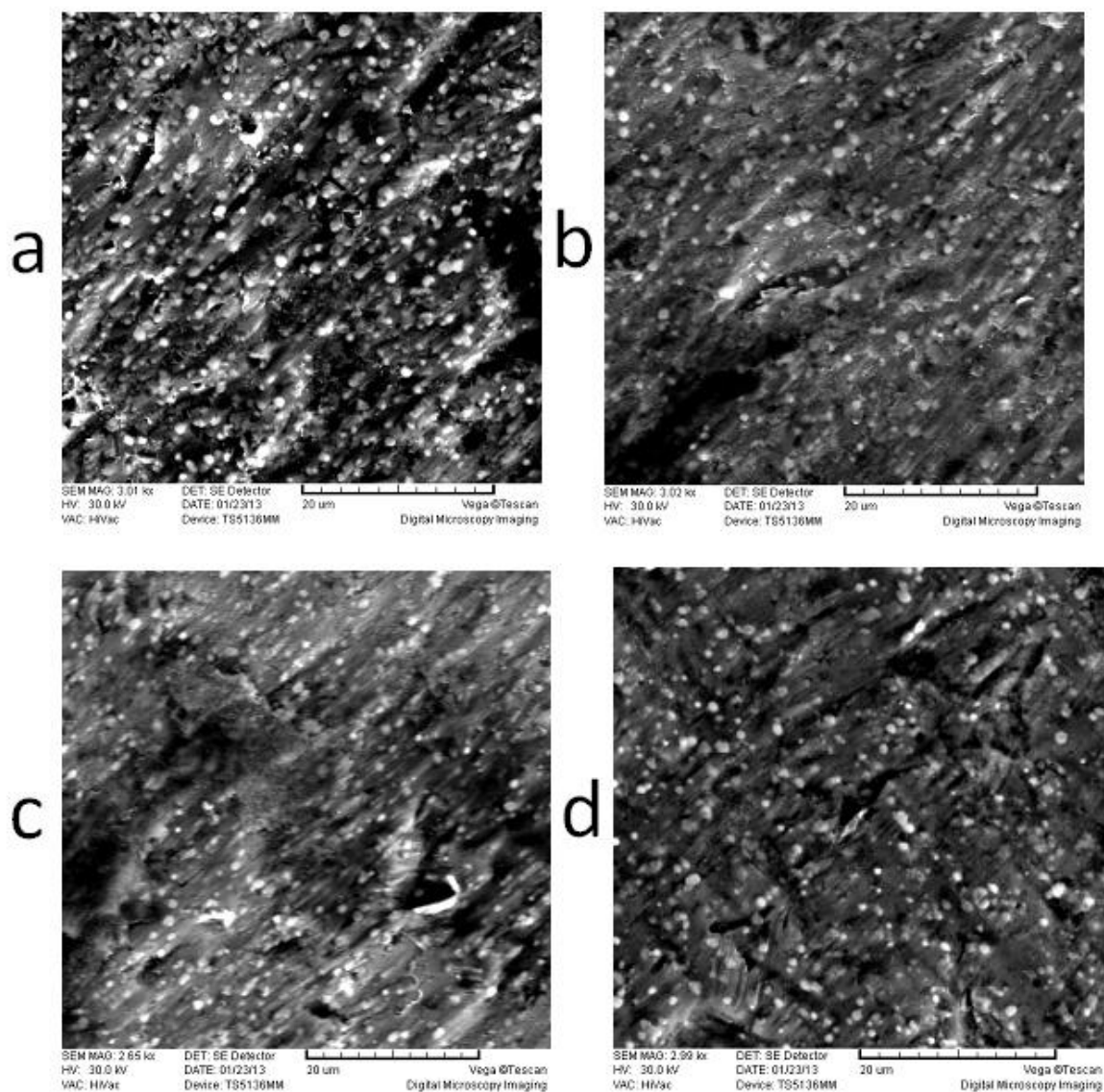
Tablica 7. Erozijsko trošenje čeličnom sačmom pod kutom od 90° S390 MC (Böhler)

Uzorak	Izgubljena masa			
	15 min	30 min	45 min	60 min
P0-1	-0,0001	-0,0004	0,0002	0,0007
P0-2	0,0004	-0,0003	0,0004	0,001
P0-SR	0,00015	-0,00035	0,0003	0,00085
P1-1	0,0001	0,0005	0,0003	0,0009
P1-2	0,0003	0,001	0,0013	0,0014
P1-SR	0,0002	0,00075	0,0008	0,00115
DH0-1	0,0003	0,0005	0,0008	0,0009
DH0-2	0,0003	0,0004	0,0011	0,0011
DH0-SR	0,0003	0,00045	0,00095	0,0010
DH1-1	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004
DH1-2	0,0002	0,0002	0,0004	0,0006
DH1-SR	0,00015	0,0002	0,00035	0,0005



Slika 39. Dijagram erozijskog trošenja čeličnom sačmom za kut 30°

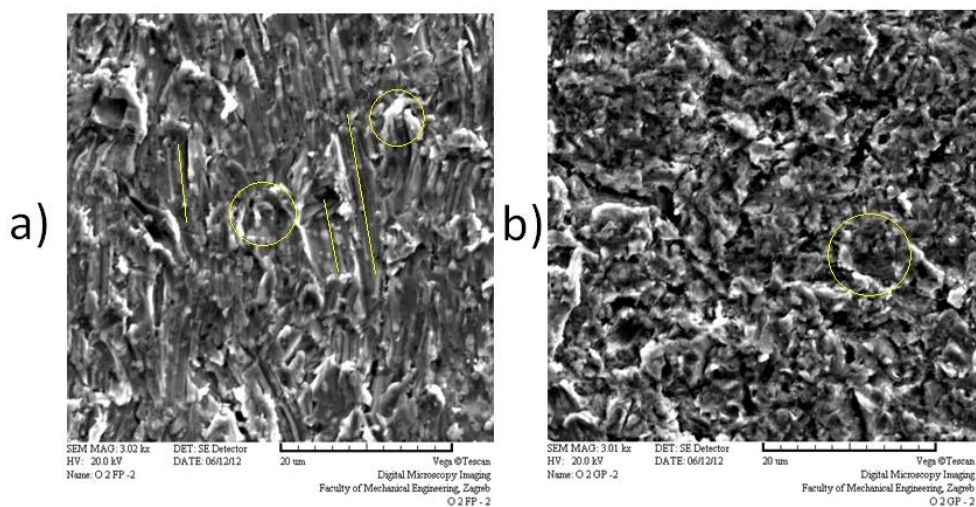
Iz tablice 7 je vidljiva ista pojava povećanja mase usred erozije čeličnom sačmom. I kod ispitivanja pod kutom od 30° ima značajan utjecaj na srednju vrijednost trošenja kod uzoraka P0 i P1. Isto tako je vidljivo da kod duboko hlađenih uzoraka DH0 i DH1 nije došlo do povećanja mase. Ujedno razlika u trošenju im nije bila toliko velika da bi značajno utjecalo na srednju vrijednost, dok kod uzoraka P0 i P1 to nije slučaj. Iz dijagrama se vidi kako je najveću otpornost pokazao duboko hlađeni nitrirani uzorak DH1, dok je nitrirani uzorak dobiven konvencionalnim postupkom pokazao najslabiju otpornost. Što se vidi u četvrtom ciklusu. U ostalim ciklusima to nije vidljivo radi povećanja mase koje je utjecalo na srednju vrijednost trošenja.



Slika 40. Površina uzoraka nakon erozijskog trošenja čeličnom sačmom pod kutom od 30° snimljenih pretražnim elektronskim mikroskopom a)P0; b)P1; c) DH0; d) DH1

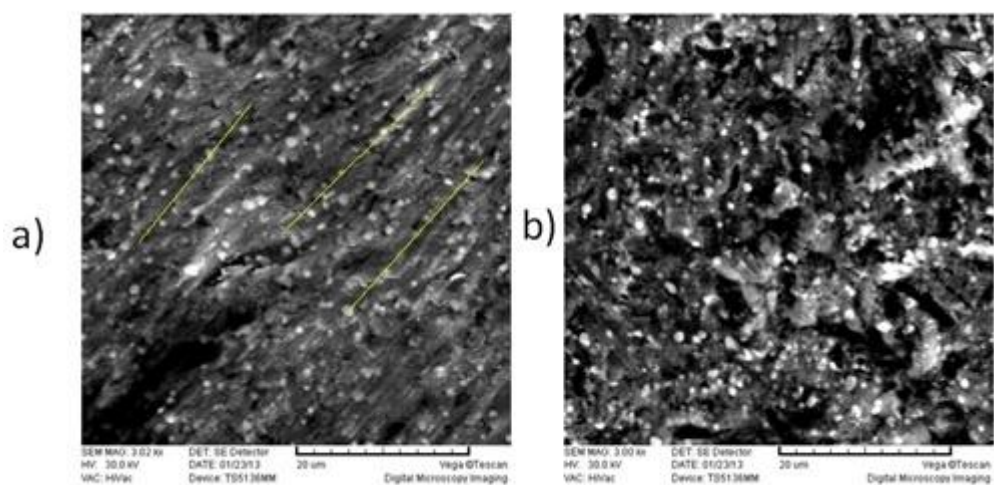
I ovi su uzorci prethodno prošli erozijsko trošenje pijeskom pod 30°, a nakon toga sačmom pod istim kutom. I sa slike 40 vidljivo je kako se na svim uzorcima još uvijek vidi smjer gibanja pješčanih zrna koja je strugala o površinu. Čelične su kuglice udaranjem uzrokovale plastične deformacije i tako nastala karakteristična topografija na slici 40 (a-d). Dio materijala pri toj plastičnoj deformaciji se okrhnuo smanjujući masu materijalu. I na ovim slikama su vidljive neke udubine koje su preostale još od trošenja pijeskom. One su sadržavale komadići sačme, zrna pijeska i prašina kada su ih čelične kuglice svojim udarima utisnule u površinu uzorka.

Usporedba trošenih površina



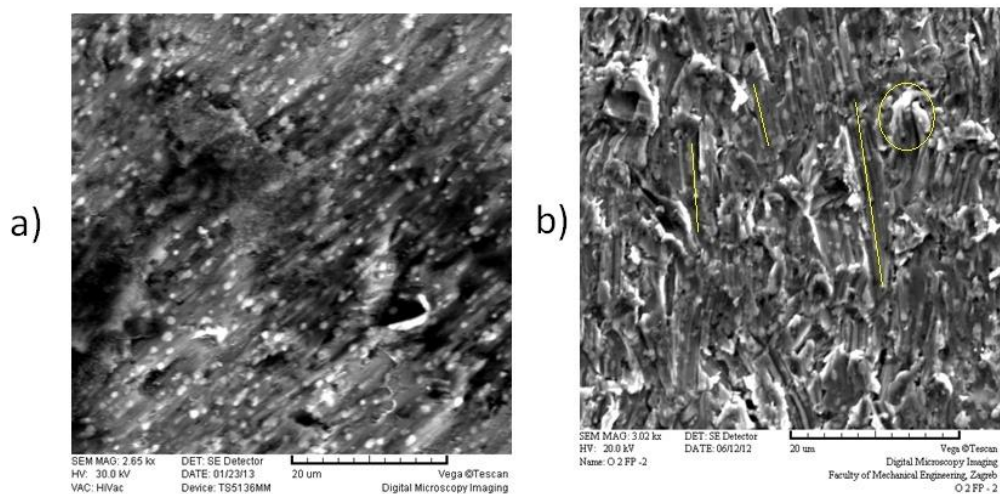
Slika 41. Usporedba pijeskom trošenih površina DH0 uzorka sniman pretražnim elektronskim mikroskopom: a) pod kutom od 30°; b) pod kutom od 90°

Na slici 41 vidi se usporedba trošenja brzoreznog čelika, koji je prošao iste režime toplinske obrade, pijeskom pod dva različita kuta upada. Na slici 41 a) je vidljivo kako su čestice pijeska klizile o površinu i tako strugale materijal, kako je shematski prikazano na slici 5. Žute crte prikazuju putanju čestice dok je strugan materijal s površine, dok kod zaokruženih dijelova na slici 41a prikazuju mjesto gdje čestice pijeska prekidaju kontakt s površinom i otkidaju materijal. Na slici 41b, čestice su udarale pod pravim kutom tako da su se u materijal širile mikro pukotine sve dok se djelić materijala nije odvojio od površine. Shematski prikaz je takvog procesa je dan na slici 6.



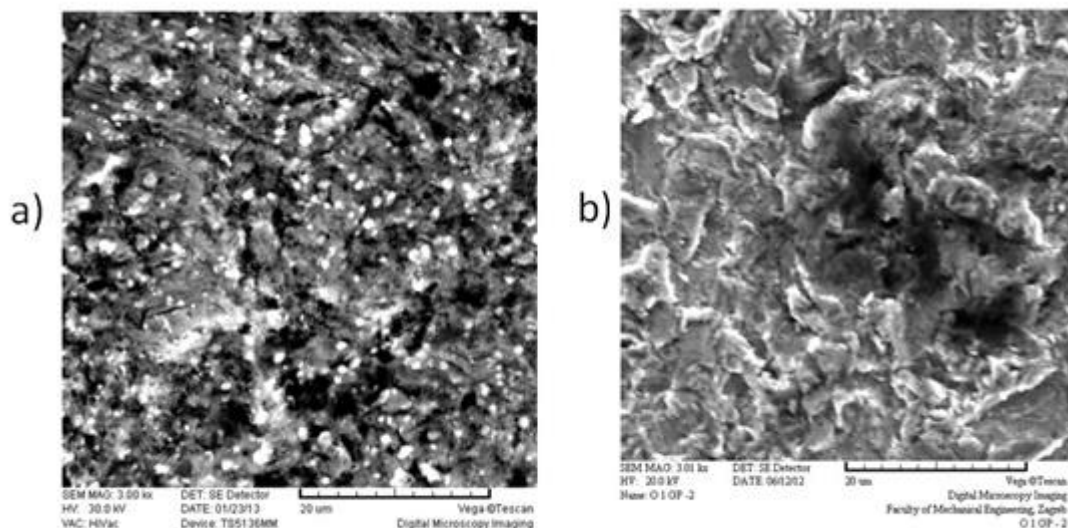
Slika 42. Usporedba sačmom trošenih površina DH0 uzorka sniman pretražnim elektronskim mikroskopom: a) pod kutom od 30°; b) pod kutom od 90°

Na slici 42 je usporedba trošenja istog brzoreznog čelika kao i na slici 41 sačmom. Iz slike 42a je vidljivo kako plastične deformacije djeluju u smjeru gibanja čelične sačme što je prikazano žutim crtama. Čelične kuglice koje upadaju pod kutom od 90° udaraju okomito od površinu i plastične deformacije se šire od točke dodira kuglice materijala (42b)



Slika 43. Usporedba trošenih površina DH0 uzorka pod kutom od 30° sniman pretražnim elektronskim mikroskopom: a) trošen sačmom; b) trošen pijeskom

Na slici 43a je kako trošena površina sačmom više pridonosi plastičnoj deformaciji površine, dok trošenje pijeskom pod kutom od 30° isto dolazi do plastične deformacije ali materijal se odsijeca od površine kada čestica prekine kontakt s površinom. I kako su ispitivanja pokazala energija čestica pijeskom pridonosi više odnošenju materijala s površine nego čestice sačme.



Slika 44. Usporedba trošenih površina DH0 uzorka pod kutom od 90° sniman pretražnim elektronskim mikroskopom: a) trošen sačmom; b) trošen pijeskom

Na slici 44b vidise kako energija koja je proizašla udarom čestice pijeska pod 90° je vjerojatno pridonijela umoru površine, te izbijanja materijala iz iste, dok kod sačme pod istim kutom upada je pridonijelo najviše plastičnoj deformaciji površine. Isto kao i kod upadnog kuta od 30° pijesak (nepravilna čestica) odnosi više materijala s trošene površine od čelične sačme (pravilna čestica) kako je prikazao i dijagram na slici 10.

ZAKLJUČAK

Iz rezultata ispitivanja erozijske otpornosti trošenja brzoreznog čelika PM S390 MC uzimajući u obzir uvjete u laboratoriju, danu opremu i režime obrade, dovode do sljedećih zaključaka:

- kod ispitivanja erozijskog trošenja sačmom duboko hladeni nitrirani uzorci su pokazali značajno veću otpornost erozijskom trošenju od ostali uzoraka, ali to bi se trebalo uzeti s rezervom jer se pokazalo da su neki uzorci dobivali masu za vrijeme procesa erozijskog trošenja
- kod udarne erozije pijeskom nitrirani uzorci su pokazali slabiju otpornost trošenju, pogotovo duboko hladeni nitrirani uzorak, a kod abrazivne erozije su isti uzorci pokazali veću otpornost trošenju, što je u skladu s teorijom, s tim da je duboko hladeni uzorak pokazao veću otpornost
- na temelju ispitivanja, pažljivog proučavanja podataka dobivenih ispitivanjem uzimajući u obzir uvjete i pojave koje su se događale tijekom ispitivanja može se zaključiti potreba za proširenjem ispitivanja na veći broj ponavljanja uz eventualnu primjenu rigoroznijeg čišćenja uzorka prije vaganja (kao bi se izbjegla kontaminacija česticama i prirast mase)

LITERATURA

- [1] Podgodnik, B., Majdić, F., Leskovšek, J. Vizintin, J.: Improving tribological properties of tool steels through combination of deep-cryogenic treatment and plasma nitriding, Elsevier B.V., 2011.
- [2] Cajner, F., Leskovšek, V., Landek, D., Cajner, H.: Effect of deep-cryogenic treatment on high speed steel properties, Taylor & Francis Group, 2008.
- [3] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor: Engineering Tribology. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [4] http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/vrst_tros_hr.html
- [5] Ivušić, V.: Tribologija, Fakultet Strojarsva i brodogradnje, 1998.
- [6] Grilec, K., Ivušić V.: Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet Strojarsva i brodogradnje, 2011.
- [7] Marušić, V.: Tribologija u teoriji i praksi, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2008.
- [8] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1733>
- [9] Kumić, I.: Diplomski rad, Fakultet Strojarsva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [10] Roberts, G., Krauss, G., Kennedy, R.: Tool steels 5th edition, ASM International, 1998.
- [11] http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/40bccae049080aaeac167bd8f668c58.pdf
- [12] http://www.ipmd.net/Introduction_to_powder_metallurgy/what_is_PM
- [13] Rosso, M., Ugues, D., Actis Grande, M.: The challenge of PM tool steels for the innovation, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006.
- [14] M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes: Alatni Materijali, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 1996
- [15] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, 1996
- [16] Ivušić, V., Franz, M.: Materijali I-2. Dio, Autorizirana predavanja 2007./2008.
- [17] Lisičar, M. : Diplomski rad, Fakultet Strojarsva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [18] Liščić, B., Stupnišek, M., Cajner, F., Filetin, T.: Toplinska obrada praktikum, Fakultet Strojarsva i brodogradnje sveučilište u zagrebu, 1991.
- [19] http://www.planit.rs/plazma_nitriranje

[20] Šolić, S: Doktorski rad, Fakultet Strojарstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.