

Utjecaj hlađenja hladnim komprimiranim zrakom na korozijsku otpornost pri obradi dijelova od nehrađajućeg čelika

Kostadin, Tihana

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:018920>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Tihana Kostadin

**UTJECAJ HLAĐENJA HLADNIM
KOMPRIMIRANIM ZRAKOM NA
KOROZIJSKU OTPORNOST PRI
OBRADI DIJELOVA OD
NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2019.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Tihana Kostadin

**UTJECAJ HLAĐENJA HLADNIM
KOMPRIMIRANIM ZRAKOM NA
KOROZIJSKU OTPORNOST PRI
OBRADI DIJELOVA OD
NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. sc. Goran Cukor

Rijeka, 2019.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Tihana Kostadin

**EFFECT OF COOLING WITH
COLD COMPRESSED AIR ON THE
CORROSION RESISTANCE OF
MACHINED PARTS MADE OF
STAINLESS STEEL**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2019.

Mentor doktorske disertacije: prof. dr. sc. Goran Cukor,
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Doktorska disertacija obranjena je dana 18.10.2019. na Tehničkom fakultetu
Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Zoran Jurković
2. Doc. dr. sc. Dario Iljkić
3. Prof. dr. sc. Dražen Bajić, FESB Split

Zahvaljujem svima koji su mi pomogli tijekom izrade doktorske disertacije na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, a posebno mentoru, prof. dr. sc. Goranu Cukoru, zatim prof. dr. sc. Loreti Pomenić, asistentici Graciel Šterpin-Valić i asistentu Lovri Šticu. Zahvaljujem kolegici, izv. prof. dr. sc. Suzani Jakovljević s Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Također zahvaljujem mojim kolegama na Veleučilištu u Karlovcu na potpori tijekom mog doktorskog studija.

Na kraju zahvaljujem mojoj obitelji, mom suprugu i mojoj kćeri Luciji, mojoj najvećoj motivaciji za rad.

SAŽETAK

Kod strojne obrade nehrđajućih čelika rezanjem se redovito preporučuje uporaba specijalnih tekućina za hlađenje i podmazivanje s visokim protokom. Međutim, konvencionalne tekućine na osnovi mineralnih ulja imaju negativni učinak na okoliš, zdravlje radnika i troškove proizvodnje. Alternativna tehnika hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom Ranque-Hilschove vrtložne cijevi protusmjernog protoka u obradi martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 postupkom tokarenja je predmet ovog istraživanja. Cilj je bio utvrditi utjecaj takvog hlađenja na korozijsku otpornost obrađene površine i njegovu tehnološku i ekonomsku održivost u usporedbi s konvencionalnim hlađenjem emulzijom u svrhu postizanja ekološki prihvatljive obrade. Zrak kao rashladni medij je potpuno prirodan pa je ova tehnika hlađenja najčišća i ekološki najprihvatljivija. Budući da se korozija može pojaviti i u suhoj obradi, korozijska otpornost je određena elektrokemijskim i gravimetrijskim mjerenjima. Kemijski sastav i izgled površine prije i nakon ispitivanja korozijske otpornosti je utvrđen pretražnom elektronskom mikroskopijom u kombinaciji s energijski razlučujućom rendgenskom spektroskopijom. Od osobitog je značaja otkriće da se obrađena površina ispitnog materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi dugoročno bolje odupire korozijskom djelovanju od one dobivene tokarenjem uz hlađenje emulzijom. Također, potvrđeno je da minimalna hrapavost obrađene površine osigurava maksimalnu korozijsku otpornost. Analiza uloge hrapavosti obrađene površine u koroziji nehrđajućih čelika je osobito zanimljiva jer je to parametar koji se može pratiti još u procesu obrade što je usvojeno u ovom istraživanju. Analizom varijance eksperimentalnih rezultata dobivenih ispitivanjem obradivosti prema okretljivom centralno kompozitnom planu pokusa je utvrđeno da različite tehnike hlađenja (emulzijom odnosno vrtložnom cijevi) ne utječu značajno na hrapavost obrađene površine ispitnog materijala i time na korozijsku otpornost. Izvornim proračunom jediničnog proizvodnog troška je dokazano da hlađenje vrtložnom cijevi nudi ekonomično rješenje na putu prema održivoj obradi. Zaključuje se da hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi pozitivno utječe na sva tri segmenta održivog razvoja – ekološki, sociološki i ekonomski pa se za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 umjesto hlađenja emulzijom preporučuje ova tehnika hlađenja.

KLJUČNE RIJEČI: tokarenje, martenzitni nehrđajući čelik X20Cr13, hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom, vrtložna cijev, korozijska otpornost, hrapavost površine.

ABSTRACT

It is recommended that cutting fluids with high flow rate are used when stainless steels are machined. However, conventional mineral oil-based cutting fluids have a negative impact on the environment, workers' health and production costs. Alternative cooling technique with cooled compressed air using the Ranque-Hilsch's counter-flow vortex tube in machining of martensitic stainless steel X20Cr13 by turning is the subject of this research. The aim was to determine the effect of such cooling on the corrosion resistance of the machined surface and its technological and economic viability compared to conventional emulsion cooling for the purpose of achieving ecologically acceptable machining. The air as a cooling medium is completely natural so this cooling technique is the cleanest and most environmentally acceptable one. Since corrosion can also occur in dry machining, corrosion resistance was determined by electrochemical and gravimetric measurements. The chemical composition and appearance of the surface before and after the corrosion resistance test was determined by scanning electron microscopy in combination with energy dispersive X-ray spectroscopy. Particularly important is the discovery that the surface of the test material machined by the turning operation with cooling by means of the vortex tube is more resistant to corrosion than that obtained by the turning operation with cooling by means of the emulsion. Also, it has been confirmed that the machined surface minimum roughness ensures maximum corrosion resistance. The role analysis of the machined surface minimum roughness in the corrosion of stainless steel is particularly interesting as this parameter can be traced yet in the machining process, and this is adopted in this research. By the analysis of variance of the experimental results obtained by the machinability testing according to the rotatable central composite design of the experiments, it was found that various cooling techniques (emulsion or vortex tube) did not significantly influence the machined surface roughness of test material, and hence the corrosion resistance. By the original calculation of the unit production cost, it has been proved that the cooling with the vortex tube offers an economical solution on the route to sustainable machining. It is concluded that the cooling with cooled compressed air using the vortex tube positively affects all three segments of sustainable development – ecologic, sociologic and economic, so for the turning of martensitic stainless steel X20Cr13, instead of conventional cooling by emulsion, the cooling with the vortex tube is recommended.

KEY WORDS: turning, martensitic stainless steel X20Cr13, cooling with cooled compressed air, vortex tube, corrosion resistance, surface roughness.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| ZAHVALA..... | I |
| SAŽETAK..... | II |
| ABSTRACT..... | III |
| | |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Problem i predmet istraživanja s hipotezom..... | 1 |
| 1.2. Svrha i ciljevi istraživanja..... | 4 |
| 1.3. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja..... | 4 |
| 1.4. Znanstvene metode..... | 6 |
| 1.5. Struktura doktorske disertacije..... | 7 |
| 2. OBRADA METALA REZANJEM..... | 9 |
| 2.1. Stvaranje i oblici strugotine..... | 10 |
| 2.2. Mehaničke pojave..... | 12 |
| 2.3. Toplinske pojave..... | 13 |
| 2.4. Trošenje i postojanost alata..... | 14 |
| 2.5. Hrapavost i integritet obrađene površine..... | 19 |
| 3. EKOLOŠKI PRIHVATLJIVA OBRADA METALA..... | 22 |
| 3.1. Funkcije SHIP-a i njegovo dovođenje u zonu obrade..... | 22 |
| 3.2. Vrste SHIP-ova..... | 25 |
| 3.3. Ekološki, zdravstveni i ekonomski aspekti SHIP-a..... | 27 |
| 3.4. Alternativne tehnike hlađenja i podmazivanja..... | 29 |
| 3.5. Hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom..... | 32 |
| 4. KOROZIJA I OBRADIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA..... | 35 |
| 4.1. Nehrđajući čelici..... | 35 |
| 4.2. Morfologija korozije nehrđajućih čelika..... | 39 |
| 4.3. Utjecaj hrapavosti obrađene površine na korozijsku otpornost..... | 42 |
| 4.4. Utjecaj zaostalih naprezanja na korozijsku otpornost..... | 43 |
| 4.5. Obradivost nehrđajućih čelika..... | 45 |

| | |
|---|-----|
| 5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE | 48 |
| 5.1. Eksperimentalne postavke..... | 48 |
| 5.1.1. Ispitni materijal | 48 |
| 5.1.2. Obradni sustav..... | 49 |
| 5.1.3. Elektrokemijska mjerenja..... | 52 |
| 5.1.4. Gravimetrijska mjerenja..... | 55 |
| 5.1.5. SEM/EDS analiza..... | 57 |
| 5.1.6. Ispitivanja obradivosti..... | 57 |
| 5.2. Rezultati i rasprava..... | 62 |
| 5.2.1. Elektrokemijski rezultati | 62 |
| 5.2.2. Usporedba elektrokemijskih i gravimetrijskih brzina korozije..... | 68 |
| 5.2.3. SEM/EDS rezultati..... | 69 |
| 5.2.4. Rezultati obradivosti – hrapavost obrađene površine | 76 |
| 5.2.5. Rezultati obradivosti – postojanost alata..... | 81 |
| 6. TROŠKOVNA ANALIZA PRIJELAZA NA ODRŽIVU STROJNU OBRADU METALA REZANJEM | 95 |
| 6.1. Razrada ekonomskog modela | 95 |
| 6.2. Troškovna evaluacija obrade..... | 101 |
| 7. ZAKLJUČAK | 108 |
| LITERATURA..... | 115 |
| POPIS OZNAKA I KRATICA..... | 122 |
| POPIS SLIKA..... | 128 |
| POPIS TABLICA..... | 132 |
| ŽIVOTOPIS | 134 |
| POPIS OBJAVLJENIH RADOVA | 135 |

1. UVOD

1.1. Problem i predmet istraživanja s hipotezom

Kod strojne obrade metala rezanjem koriste se različiti postupci za uklanjanje viška materijala. Tri primarna postupka su tokarenje, bušenje i glodanje. Svaki postupak na svoj način poboljšava jedinstvena svojstva svakog proizvoda.

Nehrđajući čelici pripadaju grupi teško obradivih materijala. Kod strojne obrade nehrđajućih čelika rezanjem se redovito preporučuje uporaba specijalnih tekućina za obradu metala s visokim protokom kako bi se prevladala njihova niska toplinska vodljivost koja ograničava učinkovito odvođenje topline od obrađivane površine u obradak i strugotinu. Prekomjerno zagrijavanje obrađivane površine nehrđajućih čelika, karakterizirano stvaranjem toplinski nijansiranih boja, mora se izbjeći jer se korozijska otpornost može pogoršati. Za vraćanje korozijske otpornosti se onda može primijeniti kiselinsko dekapiranje površine gotovog izratka. Drugi razlog uporabe tekućina za obradu metala je sklonost nehrđajućih čelika formiranju kontinuirane (tekuće) strugotine koja se lijepi na prednju površinu alata i ciklički stvara naljepak. Ova pojava rezultira niskom kvalitetom obrađene površine koja sa sobom donosi i slabiju korozijsku otpornost. Nakon obrade je potrebno ukloniti sve tragove tekućine za obradu metala kako bi se omogućila samopasivacija obrađene površine.

Temeljne funkcije tekućina za obradu metala su hlađenje, ispiranje i podmazivanje tijekom procesa rezanja. Većina njih je formulirana iz mineralnih ulja koja se izdvajaju iz sirove nafte i čija je biorazgradivost jako niska. Zbrinjavanje otpadnih tekućina za obradu metala otvara brojna ekološka pitanja osobito kada se uzme u obzir da se radi o jednom od najsloženijih i najopasnijih vrsta otpada s visokim organskim nabojem. Moguće prskanje i prolijevanje, pražnjenje kroz kanalizaciju ili sustav odvodnje oborinske vode odnosno nepropisno odlaganje i tretiranje u bilo kojoj fazi njihovog životnog ciklusa može onečistiti okoliš i kontaminirati površinske i podzemne vode.

Tekućine za obradu metala zahtijevaju redovito održavanje kako bi se kontrolirale njihove optimalne karakteristike. One su bogati okoliš za rast bakterija i gljivica. Prisutnost bakterija u tekućinama za obradu metala može također promijeniti njihovu pH vrijednost i povećati

rizik od korozije na alatnom stroju i obratku. Osim toga, one mogu biti posebno opasne za radnike u pogonu. Tipični zdravstveni problemi operatera strojeva za obradu metala rezanjem uključuju kožne bolesti uzrokovane direktnim kontaktom te maligne i nemaligne bolesti respiratornog sustava. Ostali opasni učinci su: učinak uljnih para, genotoksični učinak, generiranje kancerogenih supstanci itd.

Navedeni negativni učinci tekućina za obradu metala na okoliš i ljude su prepoznati kako kroz uvođenje novih, strožih zakonskih regulativa u svrhu zaštite prirodnih dobara tako i kroz razvoj sustava za upravljanje zdravljem i sigurnošću osoba na radu. Međutim, ionako visoki trošak uporabe ovih tekućina, koji kod obrade teško obradivih materijala dostiže i do trideset posto ukupnih troškova proizvodnje, raste s porastom broja i opsega zakona i propisa o zaštiti okoliša i osoba na radu. Primjerice, troškovi zbrinjavanja otpadnih tekućina za obradu metala mogu u nekim slučajevima biti i preko četiri puta viši od njihove nabavne cijene.

Potreba da se uporaba tekućina za obradu metala promatra s tri aspekta, ekološkog, zdravstvenog i ekonomskog, predstavlja veliki izazov znanstvenicima u potrazi za boljim rješenjima koja će biti tehnički i ekonomski konkurentna, a neće biti prijetnja budućnosti, odnosno održivosti strojne obrade. Tako se danas već govori o posebno prilagođenoj obradi odnosno proizvodnji koristeći nazive "ekološki prihvatljiva obrada", "održiva proizvodnja", "zelena proizvodnja" i sl.

Najbolji pristup za uklanjanje negativnih učinaka tekućina za obradu metala je potpuno uklanjanje njihove uporabe, što je poznato kao suha obrada. Međutim, suha obrada nije primjenjiva u svim operacijama strojne obrade uglavnom zbog prekomjernog trošenja alata ili niske kvalitete obrađene površine. Kako bi se poboljšala obradivost u suhoj obradi, za hlađenje alata i obratka se može koristiti ohlađeni komprimirani zrak. Zrak kao rashladni medij je potpuno prirodan pa je ova tehnika hlađenja najčišća i ekološki najprihvatljivija. Ohlađivanje komprimiranog zraka za primjenu u operacijama obrade metala rezanjem se može najlakše postići vrtložnom cijevi. To je jednostavna naprava bez pokretnih dijelova koja komprimirani zrak istovremeno dijeli u dva vrtložna strujanja i to s višom i nižom temperaturom od ulazne.

Korozija se može pojaviti i u suhoj obradi, a ne samo zbog uporabe tekućina za obradu metala koje se miješaju s vodom. Martenzitni nehrđajući čelici nemaju tako dobru korozijsku

otpornost kao ostale skupine nehrđajućih čelika. Međutim, jedna od njihovih prednosti kod obrade rezanjem je viša toplinska vodljivost u usporedbi s ostalim skupinama što omogućava bolje hlađenje alata. Zbog toga su prvi izbor za istraživanje o izvedivosti prijelaza na tehniku hlađenja vrtložnom cijevi u obradi nehrđajućih čelika.

Slijedom navedenog, formuliran je **problem istraživanja**:

Tehnika hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi nije aktivno zastupljena u strojnoj obradi nehrđajućih čelika što negativno utječe na sva tri segmenta održivog razvoja strojne obrade – ekološki, sociološki i ekonomski.

Sukladno problemu istraživanja definiran je **predmet istraživanja**:

Istražiti tehniku hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi u obradi martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 postupkom tokarenja, utvrditi utjecaj takvog hlađenja na korozijsku otpornost obrađene površine te u tom smislu tehnološku i ekonomsku održivost obrade u usporedbi s konvencionalnim hlađenjem emulzijom za obradu metala.

Na osnovi najvažnijih odrednica problema i predmeta istraživanja postavljena je **radna hipoteza**:

Uvođenjem hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 može se ukloniti ekološko, zdravstveno i ekonomsko opterećenje svojstveno konvencionalnom hlađenju emulzijom za obradu metala i postići održivost obrade bez žrtvovanja njezinog učinka.

Radna hipoteza konkretizira se s tri **pomoćne hipoteze**, i to:

P. H. 1: Postoji povezanost između korozijske otpornosti i hrapavosti obrađene površine, odnosno korozijska otpornost je viša za nižu površinsku hrapavost.

P. H. 2: Zamjena konvencionalne emulzije ohlađenim komprimiranim zrakom ne utječe značajno na hrapavost obrađene površine i time na korozijsku otpornost.

P.H. 3: Hlađenje vrtložnom cijevi može osim ekoloških i zdravstvenih koristi ponuditi i ekonomsku korist.

1.2. Svrha i ciljevi istraživanja

Razvoj ekološke svijesti, briga za zdravlje radnika i sve stroži zakonski propisi prisiljavaju proizvodna poduzeća na drastično smanjenje potrošnje tekućina za obradu metala i, ako je moguće, potpuno napuštanje njihove uporabe. Suha obrada automatski ispunjava uvjete ekološke i socijalne prihvatljivosti. Ipak, ostaje pitanje ispunjavanja ekonomskog uvjeta održivosti. U tom smislu, implementiranje tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi u proces suhe obrade martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 postupkom tokarenja s namjerom snižavanja troškova, a zadržavanja ili povećanja kvalitete obrade, predstavlja **svrhu istraživanja**.

Cilj istraživanja je bio utvrditi utjecaj tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi na korozijsku otpornost obrađene površine martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 postupkom tokarenja i njezinu tehnološku i ekonomsku održivost u usporedbi s konvencionalnim hlađenjem emulzijom za obradu metala. Dokazivanje opravdanosti uporabe predložene tehnike hlađenja i njezina učinkovitost kod tokarenja ispitnog materijala predstavljat će nova saznanja za područje obrade nehrđajućih čelika.

1.3. Kratki pregled dosadašnjih istraživanja

Brinksmeier i sur. [16] istražuju mehanizme djelovanja i svojstva tekućina za obradu metala te daju njihov kompletan pregled. Osim prednosti u vidu porasta postojanosti alata, poboljšanja kvalitete obrađene površine i snižavanja troškova eventualne naknadne obrade te povećanja produktivnosti obrade, uporaba tekućina za obradu metala na osnovi mineralnih ulja također donosi određene negativne učinke. Lawal [51] navodi negativne učinke na okoliš povezane s njihovom uporabom: onečišćenje površinskih i podzemnih voda, zraka, tla, a time i onečišćenje poljoprivrednih proizvoda i hrane. Zbog toga tekućine za obradu metala na osnovi mineralnih ulja zahtijevaju posebnu fizičku i kemijsku obradu prije odlaganja i zbrinjavanja [89]. Schwarz i sur. [73] navode zdravstvene probleme radnika koji nastaju

uslijed udisanja aerosola iz ovih tekućina: respiratorne bolesti (astma, kronični bronhitis, hipersenzitivni pneumonitis), rak, alergije i kožne bolesti. Bierma i Waterstraat [9] u svojim studijama dijele trošak uporabe tekućina za obradu metala na trošak nabave i skriveni trošak koji uključuje pojedinačne troškove svih faza njihovog životnog ciklusa. Rezultati istraživanja pokazuju od 1,5 do 5,5 puta viši skriveni trošak u odnosu na trošak nabave.

Negativni učinci tekućina za obradu metala sve više usmjeravaju proizvodnu industriju prema suhoj obradi kao načinu strojne obrade budućnosti. Weinert i sur. [85] istražuju prednosti suhe obrade te govore o uštedi kao i o porastu imidža poduzeća u slučaju kada se ne koriste konvencionalne tekućine za obradu metala. Izdvajaju sljedeće: nepostojanje bilo kakvog negativnog utjecaja na okoliš i čovjeka, smanjenje proizvodnih troškova uslijed nekorištenja tekućina za obradu metala, lakše recikliranje odvojene čestice koja nije onečišćena tekućinom za obradu metala i izbjegavanje odmašćivanja obratka po završetku obrade. Young i sur. [87] istražuju mogućnosti primjene suhe obrade za pojedine operacije u odnosu na vrstu materijala obratka. Zaključuju da je primjena suhe strojne obrade moguća kod većine operacija i materijala obratka, a najkritičnije operacije su izrada provrta i posebno slučaj dubokog bušenja. Koshy [47] istražuje suhu obradu alatom koji ima više slojeva prevlaka od CrN i Mo₂N, gdje Mo₂N formira potrošni oksidni film koji podmazuje pri visokim temperaturama (toplinski aktivirani samopodmazujući mehanizam). Kalyan Kumar i Choudhury [45] dolaze do naizgled kontradiktornog zaključka o pogodnosti suhe obrade pri visokim brzinama rezanja kada zbog porasta temperature dolazi do omekšavanja materijala obratka i smanjenja sile rezanja te posljedično porasta postojanosti alata.

Problem nedostajućeg hlađenja i odvođenja strugotine iz zone rezanja može se kod suhe obrade riješiti implementiranjem tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom. Ginting i sur. [32] donose pregled ovih tehnika, a najjednostavniji način izvedbe predstavlja uporaba vrtložne cijevi koja iziskuje isključivo dobavu određene količine i tlaka zraka te omogućuje njegovo hlađenje bez potrebe za dodatnim izvorom električne energije. Cijena vrtložne cijevi s priborom iznosi između 3750 – 7500 kn što je povoljno i za male proizvodne tvrtke. Boswell [13] tvrdi da je takav sustav sposoban isporučiti učinak hlađenja koji je vrlo usporediv s uobičajenim tekućinama za obradu metala i daje bolje performanse obrade u usporedbi sa suhom obradom bez hlađenja zrakom. Liu i sur. [55] su ustanovili da kod tvrdog tokarenja titanove slitine Ti6Al4V, tehnika hlađenja vrtložnom cijevi u usporedbi sa suhom obradom bez nje jednostavno proizvodi zgužvanu i lomljivu strugotinu, osigurava znatno nižu

temperaturu rezanja (do 57,1 %), smanjuje trošenje alata i smanjuje prosječnu vrijednost hrapavosti obrađene površine (do 27,6 %). Nadalje, Liu i Chou [54] su utvrdili da kod tokarenja hipereutektičkih Al-Si slitina, tehnika hlađenja vrtložnom cijevi u usporedbi sa suhom obradom bez nje smanjuje trošenje stražnje površine alata ovisno o uvjetima rezanja (do 20 %), temperaturu u sučelju alata i strugotine (do 7 %) i silu rezanja uglavnom zbog smanjenja adhezije i naljepka. Autori također dolaze do zaključka da se uporabom viših brzina rezanja i nižih vrijednosti posmaka uz hlađenje vrtložnom cijevi ostvaruje smanjenje temperature u zoni rezanja i posljedično porast postojanosti alata u odnosu na hlađenje emulzijom za obradu metala.

S obzirom na vezu između hrapavosti obrađene površine i korozijske otpornosti, rezultati istraživanja su pokazali da niža hrapavost obrađene površine povećava otpornost na rupičastu koroziju tokarenih uzoraka od austenitnog AISI 304 [35], superaustenitnog ASTM A744 CN3MN [33] i super duplex UNS S32760 [22] nehrđajućeg čelika. Zanimljivi su rezultati koje su dobili Bueno i sur. [18] proučavanjem rupičaste korozije supermartenzitnog nehrđajućeg čelika (13 % Cr) prethodno mokro brušenog SiC brusnim papirima različitih gradacija. Autori su otkrili da je jedino na najfinije obrađenoj površini ($Ra = 0,04 \mu\text{m}$) došlo do repasivacije nakon početnog stvaranja rupica pa se one više nisu širile niti su se inicirale nove.

S obzirom na moguće korozivno djelovanje emulzija za obradu metala, zanimljivo je istražiti utjecaj tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi na korozijsku otpornost obrađene površine. Budući da pretraživanjem najznačajnijih bibliografskih baza (*Web of Science*, *Science Direct*, *Scopus*, *Springer Link* i *Google Scholar*) nije pronađen takav rad, stvoren je prostor za istraživanja o mogućem unapređenju tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na sva tri segmenta održivog razvoja – ekološkog, sociološkog i ekonomskog.

1.4. Znanstvene metode

Prilikom istraživanja, formuliranja i predstavljanja rezultata istraživanja korištene su u odgovarajućim kombinacijama sljedeće znanstvene metode: induktivna i deduktivna, metode analize i sinteze, specijalizacije i generalizacije, klasifikacije, kompilacije, komparacije, planiranja pokusa, mjerenja, statističke metode i metode modeliranja.

1.5. Struktura doktorske disertacije

Struktura doktorske disertacije se sastoji od sedam međusobno povezanih dijelova.

U prvom dijelu, **UVODU**, navedeni su problem i predmet istraživanja, radna hipoteza i pomoćne hipoteze, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode i obrazložena je struktura doktorske disertacije.

U drugom dijelu rada pod naslovom **OBRADA METALA REZANJEM**, opisuju se osnovni pojmovi obrade metala rezanjem, stvaranje i oblici strugotine, mehaničke i toplinske pojave, trošenje i postojanost alata te hrapavost i integritet obrađene površine.

EKOLOŠKI PRIHVATLJIVA OBRADA METALA je naslov trećeg dijela u kojem su tekućine za obradu metala prvo definirane kao sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, a zatim su opisane njihove funkcije, načini dovođenja u zonu rezanja, vrste i osnovni sastav. Posebno su istaknuti ekološki, zdravstveni i ekonomski aspekti tekućina za obradu metala te analizirane alternativne tehnike hlađenja i podmazivanja za postizanje ekološki prihvatljive obrade. Konačno, opisana je tehnika hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi koja se koristi u eksperimentalnom istraživanju.

U četvrtom dijelu pod naslovom **KOROZIJA I OBRADIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA**, nakon klasificiranja i upoznavanja s morfologijom korozije nehrđajućih čelika, analizirani su utjecaji hrapavosti obrađene površine i zaostalih naprezanja na korozijsku otpornost te su navedene osnovne smjernice za obradu nehrđajućih čelika.

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE je naslov petog, najopširnijeg dijela u kojem su prvo opisane eksperimentalne postavke (ispitni materijal, obradni sustav, elektrokemijska i gravimetrijska mjerenja za određivanje brzine korozije, SEM/EDS analiza površina uzoraka i okretljivi centralno kompozitni plan pokusa za ispitivanje obradivosti), a zatim su predloženi rezultati istraživanja dobiveni izvođenjem četrdeset i devet pokusa, statistička analiza rezultata pokusa i matematički modeli dobiveni njihovom višestrukom regresijskom analizom. Također, rezultati korozijske otpornosti i obradivosti ispitnog materijala u uvjetima tokarenja uz konvencionalno hlađenje emulzijom za obradu metala odnosno hlađenje

ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi su raspravljani u funkciji dokazivanja radne hipoteze.

U šestom dijelu pod naslovom **TROŠKOVNA ANALIZA PRIJELAZA NA ODRŽIVU STROJNU OBRADU METALA REZANJEM**, razvijen je izvorni proračun jediničnog proizvodnog troška za slučaj hlađenja emulzijom i slučaj hlađenja vrtložnom cijevi te je elaborirana ekonomska korist od uvođenja tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi.

U posljednjem dijelu, **ZAKLJUČKU**, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazana postavljena radna hipoteza uz iznošenje znanstvenog doprinosa, očekivane primjene rezultata i smjernica budućih istraživanja.

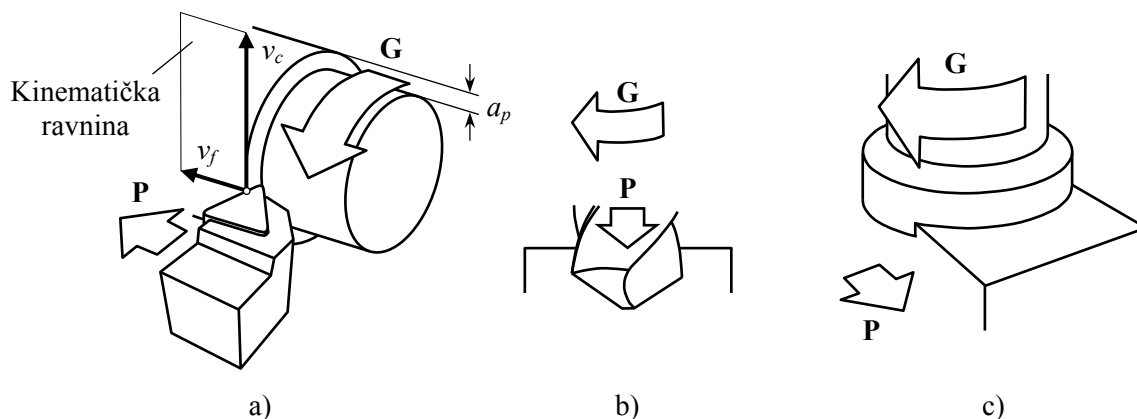
2. OBRADA METALA REZANJEM

Tehnologija strojne obrade metala **odvajanjem čestica** (engl. *machining*) obuhvaća skup konvencionalnih i nekonvencionalnih proizvodnih postupaka kojima se metalnom obratku daje traženi oblik, određene dimenzije i tražena kvaliteta površine *uklanjanjem (oduzimanjem) viška materijala*. Omogućava postizanje najbolje točnosti, najužih tolerancija i najbolje kvalitete površine u usporedbi s drugim proizvodnim tehnologijama (lijevanje, oblikovanje deformiranjem itd.) pa stoga posebno utječe ne samo na karakteristike proizvoda nego i na njihovu cijenu.

Oblikovanje obradaka *konvencionalnim* postupcima, tj. kada se mehaničkim djelovanjem reznog klina alata višak materijala skida u obliku *strugotine*, naziva se **obrada rezanjem** (engl. *cutting*). *Strugotina ima definirani geometrijski oblik, dok je čestica širi pojam i ne mora biti geometrijski definirana* [50]. Koriste se alati definirane rezne geometrije (jednorezni i višerezni alati) i nedefinirane rezne geometrije (abrazivni alati s čvrsto vezanim ili slobodnim abrazivnim zrnima). Kod postupaka obrade rezanjem alatima definirane rezne geometrije (tokarenje, bušenje, glodanje i ostali) se debljina strugotine približno kreće u granicama 0,025 – 2,5 mm, dok kod postupaka obrade rezanjem alatima nedefinirane rezne geometrije (brušenje, poliranje i ostali) ona može iznositi 0,0025 – 0,25 mm [27].

Nekonvencionalni postupci ne stvaraju strugotinu pri obradi, već se višak materijala odnosi u obliku čestica atomske i submikroskopske veličine primjenom mehaničke (osim rezanja), kemijske, elektrokemijske i toplinske energije ili kombinacijom ovih energija. Odsustvo tvrdih alata s reznom oštricom čini ove postupke nekonvencionalnima. Oni ne mogu zamijeniti konvencionalne postupke odnosno obradu rezanjem, nego se koriste samo kada su ekonomski opravdani ili je obradak nemoguće obraditi konvencionalnim postupcima [88].

Suvremena obrada rezanjem izvodi se na obradnom sustavu kojeg čine CNC (engl. *Computer Numerical Control*) alatni stroj, alat, obradak i po potrebi naprava. Postupak obrade rezanjem definiran je vrstama i oblicima alata i oblicima obradaka, s jedne strane, te vrstama i kombinacijama gibanja alata i obratka, s druge strane, slika 2.1.



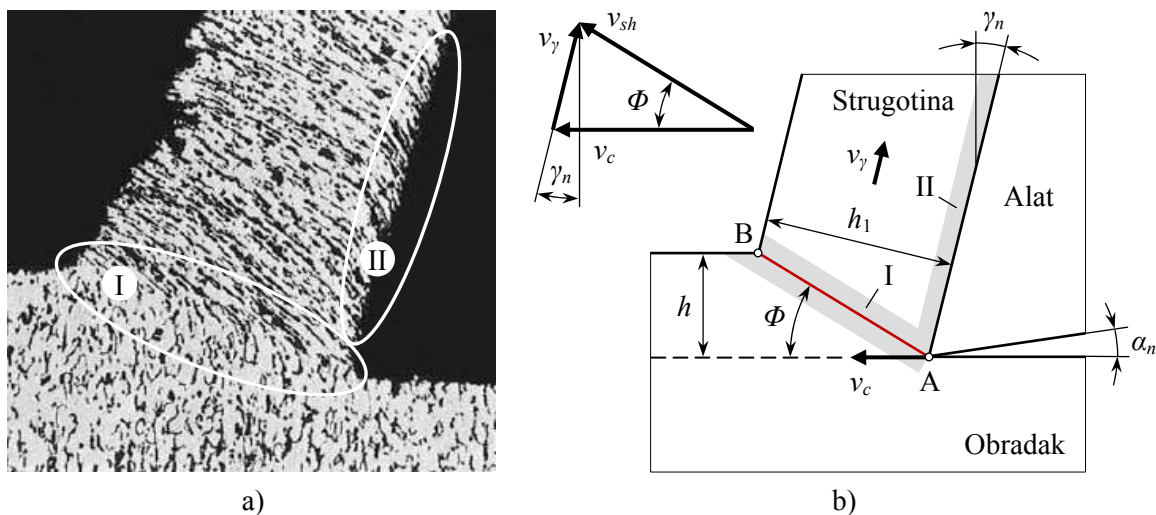
Slika 2.1. Gibanja alata i obratka kod primarnih postupaka obrade rezanjem. a) tokarenje, b) bušenje, c) glodanje; G glavno gibanje, P posmično gibanje, a_p dubina rezanja, v_c brzina rezanja, v_f posmična brzina

Kombinacija **parametara rezanja** (brzina rezanja, posmak i dubina rezanja) potpuno određuje relativno kretanje između alata i obratka, slika 2.1. *Brzina rezanja* v_c je brzina glavnog gibanja, odnosno relativna brzina glavne oštrice alata u odnosu na obradak odgovorna za stvaranje strugotine. *Posmak* f je pomak alata u odnosu na obradak u smjeru *posmične brzine* v_f odgovorne za kontinuitet stvaranja strugotine izražen po okretaju, zubu, hodu ili dvostrukom hodu (ovisno o postupku). *Dubina rezanja* a_p je debljina sloja materijala kojeg se uklanja jednim prolazom alata.

2.1. Stvaranje i oblici strugotine

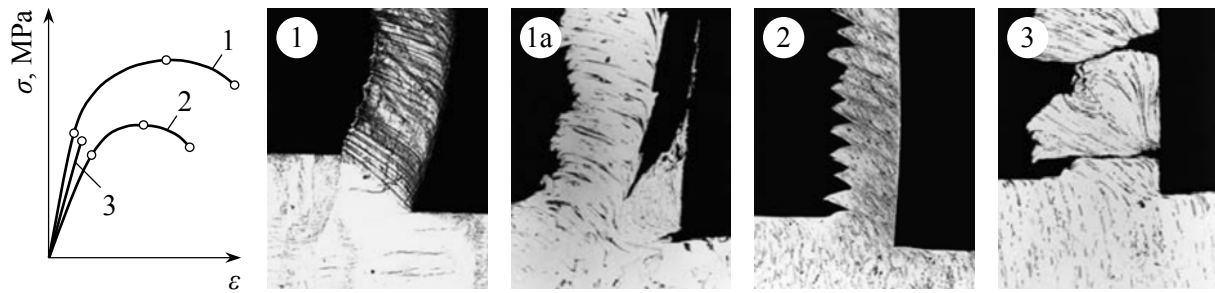
Na slici 2.2 prikazano je *ortogonalno* rezanje. U proces rezanja uključene su *prednja* i *stražnja* površina alata. Njihovo sjecište predstavlja *glavnu oštricu* alata koja je u ovom slučaju okomita na vektor brzine rezanja v_c . Kretanje strugotine uzduž prednje površine alata je usporeno i odvija se brzinom $v_\gamma < v_c$. Normalni *prednji kut* alata γ_n može biti pozitivan, kao na slici 2.2b, nula ili negativan. On treba biti toliko velik koliko dozvoljava čvrstoća alata. Veći se uzima za meke materijale, manji ili negativan (robusniji alat, jača oštrica) za vrlo tvrde i krte materijale obratka. Veliki prednji kut smanjuje sabijanje strugotine na prednjoj površini alata, a time i silu rezanja. Normalni *stražnji kut* alata α_n mora biti uvijek pozitivan. Ako je premalen, stražnja površina alata i svježe obrađena površina intenzivno taru jedna o drugu što onda uz brže trošenje alata uzrokuje i lošu kvalitetu obrađene površine. Ako je prevelik, vrh alata će biti slabiji što može uzrokovati njegov lom.

Stvaranje strugotine lokaliziranim smičnim procesom (tzv. *primarna deformacija*) se odvija u vrlo uskom području oko "idealizirane ravnine smicanja" [63], nagnute pod ostrim kutom Φ prema vektoru brzine rezanja, slika 2.2b. Ovo je područje poznato kao *primarna zona smicanja*. Strugotina zatim prolazi preko prednje površine alata i prima dodatnu deformaciju (tzv. *sekundarna deformacija*) u tankom kontaktnom sloju (do približno 10 % debljine strugotine) zbog smicanja i klizanja strugotine uzduž alata. Ovo je područje poznato kao *sekundarna zona smicanja*. Na slici 2.2a su jasno vidljive obje zone.



Slika 2.2. Zone smicanja kod stvaranja strugotine. a) mikrograf korijena strugotine [75], b) jednostavni model ortogonalnog rezanja; I primarna zona smicanja, II sekundarna zona smicanja, AB idealizirana ravnina smicanja, h debljina neodrezane strugotine, h_1 debljina skinute strugotine, v_c brzina rezanja, v_{sh} brzina smicanja, v_y brzina strugotine, Φ kut smicanja, α_n normalni stražnji kut alata, γ_n normalni prednji kut alata

Pri obradi rezanjem duktilnih materijala stvara se *tekuća* strugotina, pri obradi krhkih materijala *trgana*, a u uvjetima između onih za stvaranje navedena dva oblika strugotine *naslagana*, slika 2.3. S obzirom na hrapavost obrađene površine tekuća je strugotina najpovoljnija, ali se za uspješnu eksploataciju obradnog sustava ona mora lomiti. Poseban je slučaj stvaranja tekuće strugotine s *naljepkom* (lažna oštrica). Naljepak (engl. *Built-Up Edge* – BUE) se ciklički formira i trga na prednjoj površini alata pri nižim brzinama rezanja što rezultira slabom kvalitetom obrađene površine.



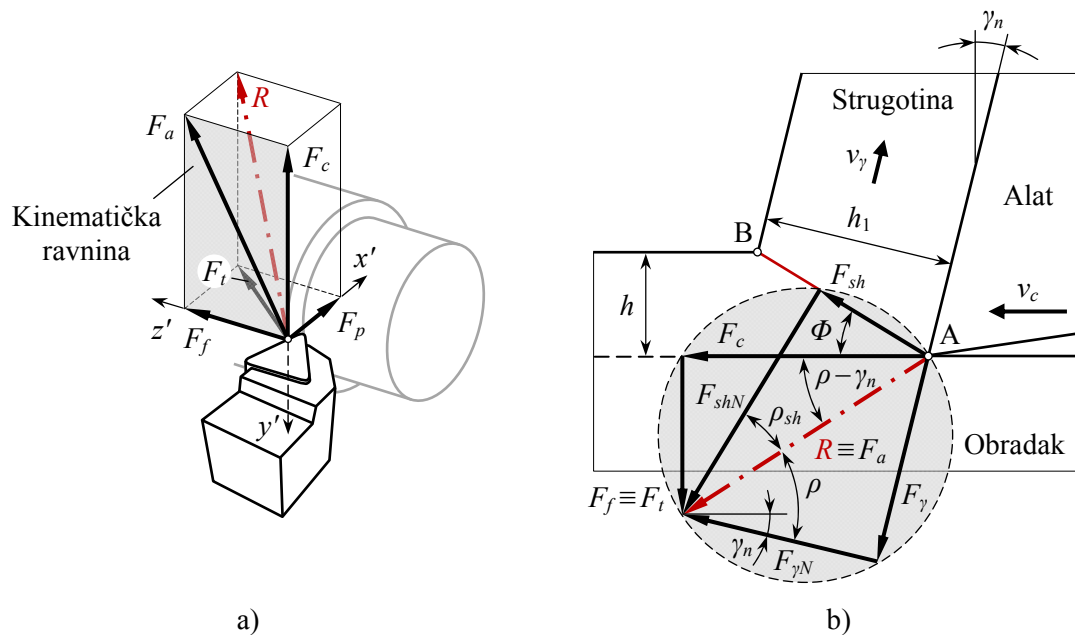
Slika 2.3. Ovisnost oblika strugotine o mehaničkim svojstvima materijala obratka. 1 tekuća strugotina, 1a tekuća strugotina i naljepak na prednjoj površini alata, 2 naslagana strugotina, 3 trgana strugotina, ε deformacija, σ normalno naprezanje (mikrografija: [21])

2.2. Mehaničke pojave

Kod *kosog* rezanja, tj. kada glavna oštrica alata i vektor brzine rezanja nisu okomiti, alatom narinuti sustav sila je *prostorni*. Za rješavanje rezultirajuće sile rezanja u promatranoj točki glavne oštrice alata većinom se koristi pravokutni Kartezijev koordinatni sustav u kojem je jedna od dvije osi postavljenih u kinematičkoj ravnini u smjeru vektora brzine rezanja dok je treća os u pravcu normale ravnine. Tako se mogu razlikovati tangencijalna, radijalna i aksijalna komponenta s obzirom na obradak ili alat (ovisno o postupku obrade). Najveća komponenta je tangencijalna pa se još naziva i glavnom silom rezanja. Na slici 2.4a prikazane su tangencijalna (glavna) F_c , aksijalna (posmična) F_f i radijalna (pasivna) F_p sila kod tokarenja. Sila F_c djeluje u smjeru vektora brzine rezanja v_c , a sila F_f djeluje u smjeru vektora posmične brzine v_f .

Kod *ortogonalnog* rezanja ne postoji komponenta rezultirajuće sile rezanja okomita na kinematičku ravninu odnosno sustav sila je *ravninski*. Tako za razliku od kosog, u slučaju ortogonalnog tokarenja ne postoji radijalna (pasivna) sila F_p , aksijalna (posmična) sila F_f je identična odrivnoj sili F_t , a rezultanta R se reducira na aktivnu silu F_a kao što je prikazano na slici 2.4b. Također, odgovarajuće komponente od R mogu se lako odrediti konstruiranjem Merchantovog kruga sila [57].

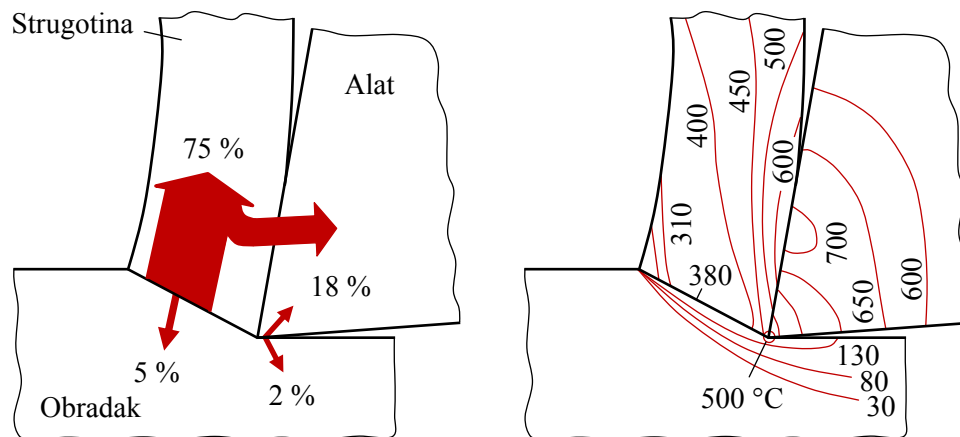
Mogućnost određivanja rezultirajuće sile rezanja odnosno njezinih komponenti prije same obrade osobito je važna za procjenjivanje potrebne snage alatnog stroja i kvalitete obrade te analizu naprezanja u primarnoj i sekundarnoj zoni smicanja.



Slika 2.4. Sustavi sila kod tokarenja. a) koso rezanje, b) ortogonalno rezanje i Merchantov krug sila; AB idealizirana ravnina smicanja, h debljina neodrezane strugotine, h_1 debljina skinute strugotine, F_a aktivna sila, F_c tangencijalna (glavna) sila, F_f aksijalna (posmična) sila, F_p radijalna (pasivna) sila, F_{sh} sila smicanja, F_{shN} normalna sila na površinu smicanja, F_t odrivna sila, F_γ sila trenja na površini kontakta strugotine i alata, $F_{\gamma N}$ normalna sila na površinu kontakta strugotine i alata, R rezultirajuća sila rezanja, v_c brzina rezanja, v_γ brzina strugotine, $x'y'z'$ lokalni koordinatni sustav, Φ kut smicanja, γ_n normalni prednji kut alata, ρ kut vanjskog kliznog trenja, ρ_{sh} kut unutarnjeg kliznog trenja

2.3. Toplinske pojave

Ukupni mehanički rad utrošen na stvaranje strugotine se gotovo u cijelosti ($\approx 99\%$) pretvara u toplinu. Oko 75% oslobođene topline otpada na mehanički rad utrošen u primarnoj zoni smicanja, dok se oko 20% odnosi na toplinu nastalu uslijed trenja na prednjoj površini alata. Također, najveća se količina generirane topline u procesu obrade rezanjem odvodi preko strugotine pa se smatra poželjnim da temperatura strugotine bude što veća. Koliki će dio generirane topline prijeći na strugotinu, alat ili obradak, najviše zavisi od brzine rezanja. Slika 2.5 prikazuje primjer distribucije topline i temperature pri obradi čelika alatom od tvrdog metala. Najveća temperatura se nalazi približno na sredini kontakta strugotine i prednje površine alata, a može iznositi i preko $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

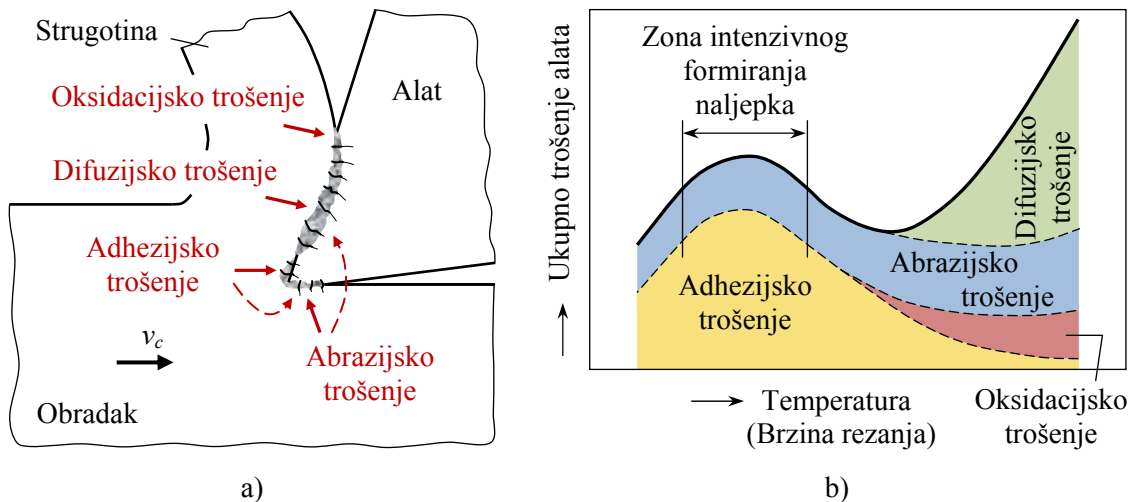


Slika 2.5. Distribucija topline i temperature u obratku, strugotini i alatu pri obradi čelika alatom od tvrdog metala [84]

2.4. Trošenje i postojanost alata

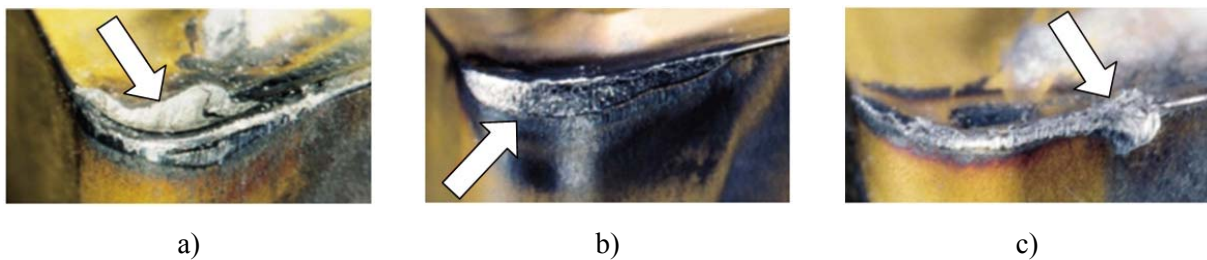
Trošenje alata izravno utječe na kvalitetu obrađene površine i ekonomiju obrade pa se najčešće koristi kao kriterij procjenjivanja obradivosti. Može se definirati na dva načina: kao *promjena oblika alata za vrijeme rezanja u odnosu na izvorni oblik koja nastaje zbog postupnog gubitka materijala alata* ili kao *postupak promjene (smanjenja) reznih svojstava alata*.

Najvažniji **mehanizmi** koji uzrokuju trošenje alata uključuju adheziju, osobito uz prisutnost naljepka, abraziju, difuziju i oksidaciju, slika 2.6. *Adhezijsko* trošenje se može opisati kao posljedica razaranja nastajućih lokalnih mikrozavara između najviših vrhova neravnina strugotine i prednje površine alata. *Abrazijsko* trošenje uzrokovano je tvrdim abrazivnim fazama u materijalu obratka ili slobodnim tvrdim česticama koje mogu nastati adhezijskim trošenjem alata ili razaranjem naljepka. *Difuzijsko* trošenje, odnosno razmjena atoma kristalnih rešetki materijala alata i obratka na kontaktnim površinama, odvija se iz područja visoke u ono niske koncentracije atoma i uglavnom uzrokuje slabljenje površinske strukture alata [11]. *Oksidacijsko* trošenje se odvija pod utjecajem visokih temperatura i kisika kada se na površini alata periodički formira i razara krhki oksidacijski sloj. Kakvo će trošenje nastati, odnosno koje će biti dominantnije, zavisi najviše od temperature rezanja, odnosno od brzine rezanja. Tako npr., pri obradi čelika dijamantnim alatom na temperaturi rezanja većoj od 600 °C troši se dijamantni alat zbog difuzijskog prijelaza ugljika s alata na strugotinu i obradak.



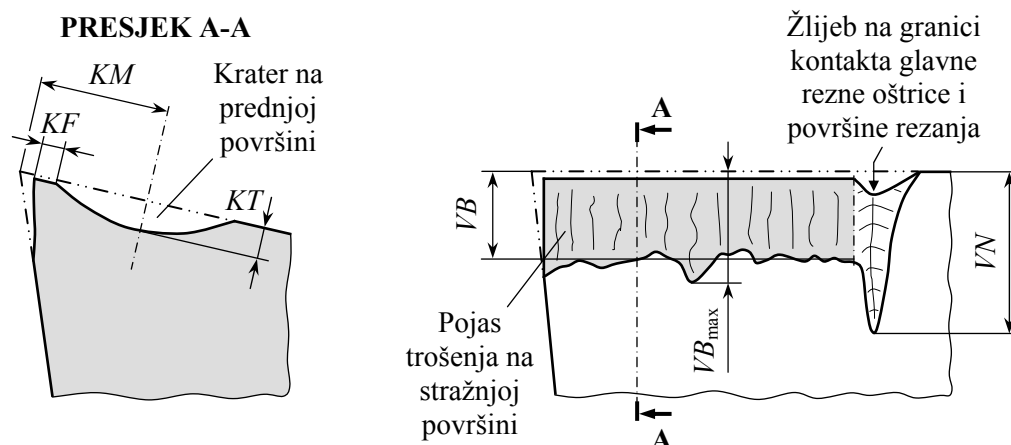
Slika 2.6. Mehanizmi trošenja alata. a) glavna područja adhezijskog, abrazijskog, difuzijskog i oksidacijskog trošenja na alatu, b) relativni udjeli različitih mehanizama u ukupnom trošenju alata s obzirom na temperaturu rezanja (brzinu rezanja)

Na slici 2.7 prikazani su najvažniji **oblici** trošenja koji se pojavljuju na prednjoj i stražnjoj površini alata: *krater*, *pojas trošenja* i *žlijeb*. Urežno trošenje u obliku žlijeba na granici kontakta glavne rezne oštrice i površine rezanja je uobičajeno kod materijala s visokim karakteristikama otvrdnjavanja kao što su nehrđajući čelici i toplinsko otporni nikal ili slitine kroma.



Slika 2.7. Najvažniji oblici trošenja reznih pločica. a) krater na prednjoj površini, b) pojas trošenja na stražnjoj površini, c) žlijeb na stražnjoj i prednjoj površini [72]

Stanje istrošenosti alata kvantificira se pomoću *parametara trošenja*. U praksi se najviše koriste parametri trošenja prednje i stražnje površine alata prema normi ISO 3685:1993(E) [40] prikazani na slici 2.8.



Slika 2.8. Karakteristični parametri trošenja prednje i stražnje površine alata prema normi ISO 3685:1993(E) [40]. KF udaljenost fronte kratera na prednjoj površini od glavne oštrice, KM udaljenost središta kratera na prednjoj površini od početne glavne oštrice, KT dubina kratera na prednjoj površini, VB i VB_{max} srednja i maksimalna širina pojasa trošenja na stražnjoj površini, VN veličina ureznog trošenja na stražnjoj površini

S obzirom na hrapavost obrađene površine, važnije je trošenje stražnje površine alata. Parametar trošenja VB može se opisati izrazom:

$$VB = K v_c^{k_1} f^{k_2} a_p^{k_3} t^{k_4}, \quad (2.1)$$

gdje je t vrijeme obrade, dok konstanta K i eksponenti k_1 , k_2 , k_3 i k_4 zavise od karakteristika obradnog sustava. Izraz (2.1) dobiva se *regresijskom analizom* rezultata pokusa.

Kriterij istrošenosti alata je zadana dopuštena vrijednost mjere trošenja na alatu (srednja širina pojasa trošenja na stražnjoj površini, dubina kratera na prednjoj površini itd.) ili neke druge mjerljive veličine na obratku (točnost mjere, hrapavost obrađene površine, neravnine zbog vibracija itd.) ili u procesu obrade (sila rezanja, moment, snaga, vibracije itd.) povezane s trošenjem alata. Kriterij istrošenosti određuju nepogodnost (ne i nemogućnost) alata za daljnju obradu. Ne postoje jednoznačni kriteriji istrošenosti alata, već ovise o uvjetima obrade i proizvodnim okolnostima. Preporučeni kriteriji istrošenosti za različite vrste alata navedeni su u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Kriteriji istrošenosti alata – preporuke [40, 64]

| Alat | Parametar trošenja | Obrada | | | |
|-------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------|-----------------|
| | | Vrlo fina | Fina | Predzavršna | Gruba |
| BČ i TM | VB , mm | 0,1 – 0,2 | 0,2 – 0,4 | 0,4 – 0,6 | 0,8 – 1,0 (1,5) |
| Rezna keramika | | 0,1 – 0,2 | 0,25 – 0,3 | 0,4 – 0,5 (0,6) | |
| TM – kratersko trošenje | KT, KI, KF , mm | $KT = 0,1 – 0,3 (= 0,06 + 0,3f)$ | | $KI = KT/KM = 0,1 – 0,4$ | |
| | | | $KF = 0,02$ | | |

Postojanost alata je vrijeme rezanja potrebno za postizanje kriterija istrošenosti alata. To znači da treba odrediti kraj onog perioda rezanja nakon kojeg daljnji rad alatom više nije ekonomski opravdan.

Ako se u vremenskim intervalima mjeri trošenje alata VB , dobiva se krivulja trošenja alata kao na slici 2.9a. Porastom brzine rezanja uz nepromijenjeni posmak i dubinu rezanja dobivaju se strmije krivulje trošenja. Primjenom kriterija istrošenosti alata dobiva se podatak o postojanosti alata T_1, T_2 i T_3 na slici 2.9a. Budući da je trošenje *stohastički proces*, ponove li se takvi pokusi u potpuno istim uvjetima, dobit će se druge krivulje trošenja i druge postojanosti alata T_1', T_2' i T_3' . S velikim brojem ponavljanja pokusa u potpuno istim uvjetima dobiva se rasipanje postojanosti alata oko neke očekivane vrijednosti – Taylorovog pravca (prema F. W. Tayloru koji ga je 1906. prvi primijenio za karakterizaciju svojih alata od brzoreznog čelika) u logaritamskom koordinatnom sustavu, slika 2.9b.

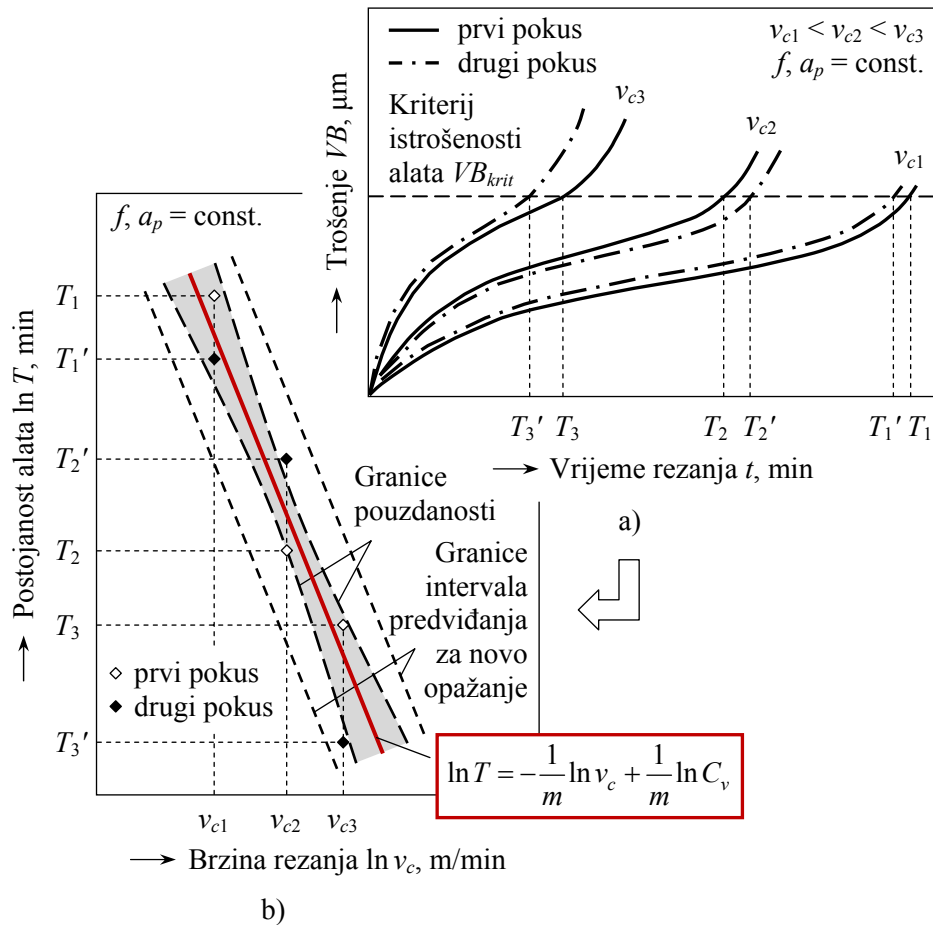
Taylorova jednadžba postojanosti alata [79] glasi:

$$T = C_T v_c^{k_v} \text{ ili } v_c T^m = C_v, \quad (2.2)$$

gdje su C_T i $C_v = C_T^m$ konstante, dok je $m = -1/k_v$ Taylorov eksponent. Ako se osim utjecaja brzine rezanja na postojanost alata uzima u obzir i utjecaje posmaka i dubine rezanja, dobiva se *proširena Taylorova jednadžba postojanosti alata*:

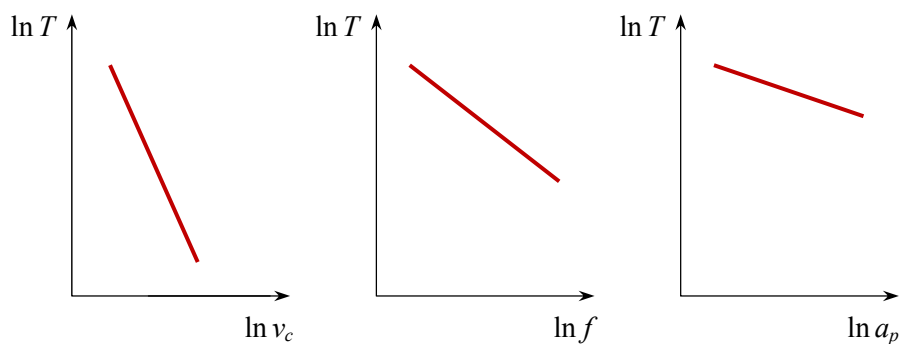
$$T = C_T v_c^{k_v} f^{k_f} a_p^{k_a}. \quad (2.3)$$

Jednadžbe (2.2) i (2.3) mogu se dobiti iz izraza (2.1) ako se uvrsti kriterij istrošenosti $VB_{krit.}$



Slika 2.9. Određivanje Taylorovog pravca. a) krivulje trošenja alata pri konstantnim veličinama posmaka f i dubine rezanja a_p , b) rasipanje postojanosti alata

Na slici 2.10 je prikazan opći oblik zavisnosti postojanosti alata od parametara rezanja u logaritamskom mjerilu. Može se uočiti da *brzina rezanja ima najveći utjecaj na postojanost alata*, zatim posmak pa dubina rezanja što znači da je u jednadžbi (2.3) onda $k_v > k_f > k_a$.

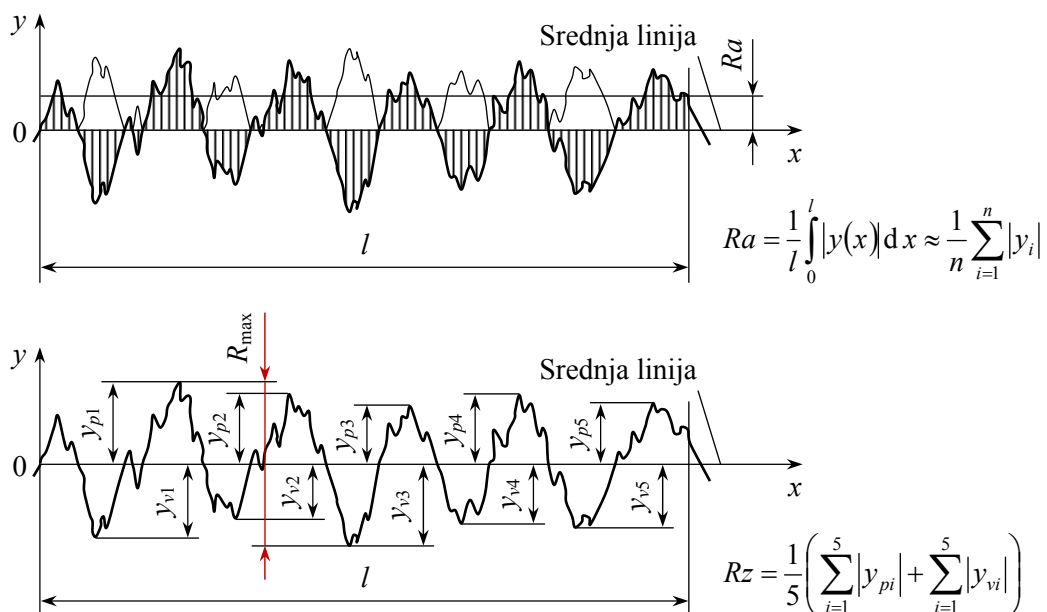


Slika 2.10. Karakteristične zavisnosti postojanosti alata T od brzine rezanja v_c , posmaka f i dubine rezanja a_p u ln-ln koordinatama

2.5. Hrapavost i integritet obrađene površine

Hrapavost obrađene površine je skup svih neravnina koje oblikuju teksturu površine u granicama odabranog isječka takve veličine da su eliminirane greške oblika i valovitosti [64]. Hrapavost je rezultat kontakta i relativnog kretanja alata i obratka tijekom procesa rezanja. Veličina hrapavosti može utjecati na smanjenje dinamičke izdržljivosti (tj. smanjenje čvrstoće oblika), pojačano trenje i trošenje tarno opterećenih površina, smanjenje preklopa kod steznog spoja (tj. smanjenje nosivosti steznog spoja) i ubrzavanje korozije.

Osnovna tri parametra hrapavosti prema normi HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010 [37] su: *srednje aritmetičko odstupanje profila* R_a koje predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije, *srednja visina neravnina* R_z koja je jednaka zbroju aritmetičkih sredina apsolutnih vrijednosti pet najvećih visina vrhova profila i pet najvećih dubina dolova profila i *maksimalna visina neravnina* R_{max} koja je jednaka zbroju visine najvišeg vrha profila i dubine najnižeg dola profila. Na slici 2.11 dan je grafički prikaz određivanja parametara R_a , R_z i R_{max} unutar referentne dužine l .



Slika 2.11. Određivanje parametara hrapavosti R_a , R_z i R_{max} unutar referentne dužine l

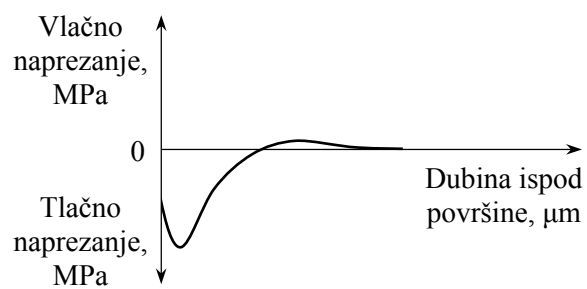
Za približno se računanje može uzeti da je $R_z \approx 4 R_a$ i $R_{max} \approx 6,4 R_a \approx 1,6 R_z$. U tablici 2.2 prikazani su stupnjevi hrapavosti obrađenih površina koji se postižu postupcima obrade rezanjem.

Tablica 2.2. Hrapavosti koje se mogu postići različitim postupcima obrade rezanjem

| Stupanj hrapavosti | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 | N11 | N12 | |
|----------------------|-------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|----|
| Ra [μm] | 0,012 | 0,025 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 3,2 | 6,3 | 12,5 | 25 | 50 |
| Piljenje | | | | | | | | | | | | | |
| Blanjanje | | | | | | | | | | | | | |
| Bušenje | | | | | | | | | | | | | |
| Glodanje | | | | | | | | | | | | | |
| Provlačenje | | | | | | | | | | | | | |
| Razvrtavanje | | | | | | | | | | | | | |
| Tokarenje | | | | | | | | | | | | | |
| Brušenje | | | | | | | | | | | | | |
| Honanje | | | | | | | | | | | | | |
| Poliranje | | | | | | | | | | | | | |
| Lepanje | | | | | | | | | | | | | |
| Superfinaš | | | | | | | | | | | | | |

Integritet obrađene površine širi je pojam koji se odnosi na površinski sloj obratka. Plastične deformacije, toplina i kemijske reakcije koje nastaju za vrijeme obrade rezanjem uzrokuju promjene u površinskom sloju, npr. zaostala naprezanja, promjenu tvrdoće, sitne i veće pukotine, rekristalizaciju i dr. Kao i hrapavost, integritet obrađene površine značajno utječe na eksploatacijska svojstva obrađenog dijela.

Zaostala naprezanja su jedan od najvažnijih ishoda procesa obrade. Svaki proces obrade ima jedinstveni potpis na zaostalim naprezanjima jer uklanja slojeve materijala s obratka vlastitim specifičnim mehanizmom. Također, grube (hrapave) površine tvore mjesta gdje su zaostala naprezanja izrazito potentna. Općenito, mehaničko djelovanje alata dovodi do plastične deformacije i promovira tlačna zaostala naprezanja koja su obično poželjna na obrađenoj površini i neposredno ispod nje jer smanjuju opasnost od nastajanja mikropukotina i povišuju otpornost na pojavu zamora. Toplinski učinak (porast temperature zbog trenja i smicanja), međutim, promovira vlačna zaostala naprezanja koja pogoduju pojavi zamornih mikropukotina i njihovom napredovanju te ugrožavaju otpornost na napetosnu koroziju. Primjer poželjne raspodjele zaostalih naprezanja u površinskom sloju prikazan je na slici 2.12.



Slika 2.12. Primjer poželjnog profila zaostalih naprezanja u površinskom sloju materijala obratka

3. EKOLOŠKI PRIHVATLJIVA OBRADA METALA

3.1. Funkcije SHIP-a i njegovo dovođenje u zonu obrade

Generiranje topline pri stvaranju strugotine ima kontrolirajući utjecaj na ukupni rezultat postupka rezanja [75]. Za zadani materijal obratka i rezni alat, brzina rezanja je glavni faktor koji utječe na količinu proizvedene topline odnosno temperaturu rezanja, nakon čega slijedi posmak i dubina rezanja. Kako bi se smanjila temperatura rezanja, dio se generirane topline odvodi pomoću specijalne **tekućine za obradu metala**. Pored hlađenja, tekućina još ispire zonu rezanja i podmazuje dodirne površine alata sa strugotinom i obrađenom površinom. Zbog tih se osnovnih funkcija ova tekućina i zove *sredstvom za hlađenje, ispiranje i podmazivanje* ili kratko SHIP¹. Dodatna važna značajka je mogućnost kratkotrajne korozijske zaštite svježe obrađene površine. Uz poboljšanje kvalitete proizvoda, uspješna primjena SHIP-a često može rezultirati poboljšanjem postojanosti alata 1,2 – 4 puta, intenziviranjem parametara rezanja za 20 – 60 % i povećanjem produktivnosti 10 – 50 % [83]. Relativna važnost hlađenja, ispiranja i podmazivanja ovisi o materijalu obratka, postupku obrade i korištenom alatu.

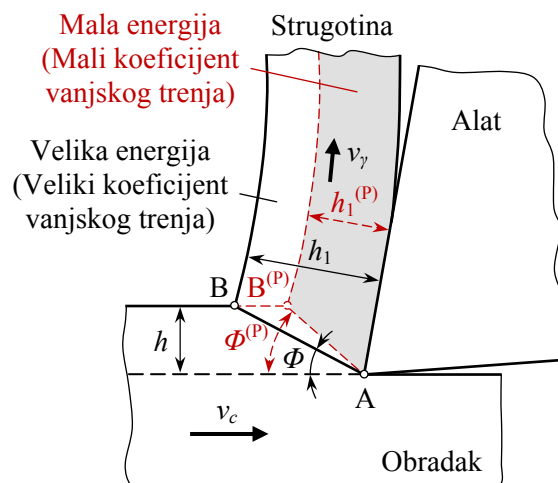
Hlađenje je najvažniji učinak SHIP-a. Kao rashladno sredstvo, SHIP pomaže u uspostavljanju toplinske stabilnosti alata i obratka pri visokim brzinama rezanja [3]. Primjena SHIP-a s većim učinkom hlađenja značajno povećava postojanost alata održavanjem temperature rezanja ispod temperature omekšavanja materijala alata i smanjenjem termokemijskog trošenja alata (difuzija). Učinak hlađenja također smanjuje toplinsku distorziju obratka i poboljšava njegovu dimenzijsku točnost te može proizvesti veće tlačno zaostalo naprezanje ili manje vlačno zaostalo naprezanje. Hlađenje je posebno važno kod obrade metala koji imaju relativno nisku toplinsku vodljivost kao što su nehrđajući čelici i legure titana. S druge strane, hlađenje tijekom prekidnog rezanja (npr. glodanja) može dovesti do toplinskih pukotina na reznoj oštrici. Jednom nastale, pukotine će se povećavati uzrokujući lošu kvalitetu obrađene površine ili lom rezne oštrice. Materijali alata osjetljivi na termošok (npr. oksidna keramika) ne smiju se hladiti.

¹ Engleski akronimi su MWF – *metalworking fluid* (tekućina za obradu metala) ili CF – *cutting fluid* (tekućina za rezanje).

Ispiranje podrazumijeva sposobnost SHIP-a da učinkovito odvodi strugotinu i čestice nastale zbog trošenja alata iz zone rezanja čime se smanjuje rizik od degradacije kvalitete obrađene površine i rizik od loma alata (posebno kod bušenja i obrade dubokih i uskih šupljina). Učinak ispiranja postaje sve važniji kako se povećava razina automatizacije koja zahtijeva čiste dijelove za robotski prihvat i za fiksiranje obratka u napravi.

Podmazivanje reznog klina alata igra značajnu ulogu u kontroli temperature rezanja. Kao mazivo, SHIP smanjuje trenje na sučeljima alata sa strugotinom i obrađenom površinom, a time i toplinu koju ono stvara. To ne samo da omogućuje više brzine rezanja, a time i veću produktivnost, već također povećava postojanost alata za zadanu brzinu rezanja. Učinak podmazivanja na stvaranje strugotine objašnjen je na slici 3.1. Zbog smanjivanja trenja na prednjoj površini alata, povećava se kut smicanja. Posljedično, površina idealizirane ravnine smicanja se smanjuje i stvara se tanja strugotina, smanjuje se sila rezanja i potrošnja energije (snage) u procesu pa tako i količina generirane topline pri stvaranju strugotine. U tipičnom se postupku rezanja može ostvariti samo *granično podmazivanje*. Stvaranje graničnog sloja maziva može spriječiti mehaničko trošenje alata (adhezija i abrazija) kao i pojavu naljepka čime se poboljšava kvaliteta proizvoda. Naljepak uzrokuje povećano trenje i mijenja geometriju alata. To, zauzvrat, često rezultira lošom završnom obradom površine i dimenzijskim nedosljednostima obratka. Također, primjenom SHIP-a s većim učinkom podmazivanja može se dobiti tanji površinski sloj obratka zahvaćen zaostalim naprezanjima. Nažalost, podmazivanje ima tendenciju gubitka učinkovitosti pri visokim brzinama rezanja. Jedan od razloga je visoka brzina kretanja strugotine uzduž prednje površine alata koja sprečava da SHIP dosegne zonu rezanja. Drugi razlog je taj što se pri visokim brzinama rezanja stvaraju visoke temperature rezanja i SHIP isparava prije nego može podmazati [8]. Zbog toga je podmazivanje prikladno samo za niske brzine rezanja i teško obradive materijale.

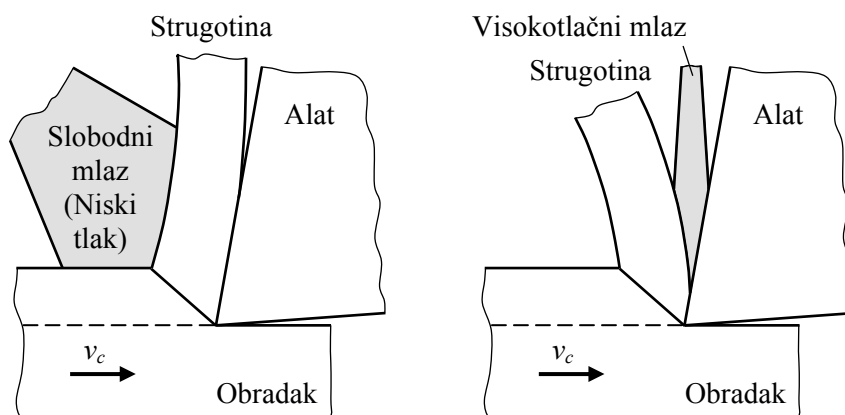
Za učinkovitost SHIP-a važna je i metoda njegovog dovođenja u zonu rezanja. Najčešće se primjenjuje plavljenje (engl. *flooding*) kontinuiranim **slobodnim mlazom** kroz posebne *vanjske* zglobno-fleksibilne cijevi pod tlakom 0,6 – 1 MPa. Protoci koji se obično kreću od 10 l/min za tokarenje do 225 l/min za čeonu glodanje osiguravaju dobre rezultate hlađenja. Materijali obratka s niskom toplinskom vodljivošću (npr. nehrđajući čelici i sl.) zahtijevaju veće volumne protoke SHIP-a.



Slika 3.1. Učinak podmazivanja na stvaranje strugotine. P podmazivanje; AB, AB^(P) idealizirane ravnine smicanja, h debljina neodrezane strugotine, h_1 , $h_1^{(P)}$ debljine skinute strugotine, v_c brzina rezanja, v_γ brzina strugotine, Φ , $\Phi^{(P)}$ kutovi smicanja

SHIP se također može atomizirati i dovesti u zonu rezanja kao **magla** (engl. *mist*) na način sličan uporabi limenke spreja. Mikrokapljice SHIP-a reda veličine 10 – 25 μm stvaraju se u komori za miješanje u koju se dovodi zrak pod tlakom 0,07 – 0,6 MPa. Magla se raspršuje u zonu rezanja i dopire do nepristupačnih područja. Prednosti ove metode u usporedbi sa slobodnim mlazom je minimizirana uporaba SHIP-a s potrošnjom 50 – 500 ml/h i bolja vidljivost obratka za vrijeme rezanja. Kao nedostaci se izdvajaju manji kapacitet hlađenja i potreba za adekvatnim ventiliranjem kako bi se spriječilo udisanje mikrokapljica SHIP-a u zraku od strane CNC operatera i drugih osoba u blizini.

Dovođenje SHIP-a u zonu rezanja **visokotlačnim mlazom** (engl. *high-pressure jet*) kao na slici 3.2, povećava učinkovitost njegovih osnovnih funkcija. Najčešća je *interna* isporuka SHIP-a kroz glavno vreteno/držak/alat. Mogu se primijeniti različiti tlakovi 5,5 – 35 MPa i protoci 5 – 75 l/min pomoću mlaznica promjera 0,8 – 1,4 mm. Visokotlačni mlaz omogućava i dodatnu funkciju SHIP-a kao lomitelja strugotine (sprečavanje stvaranja tekuće strugotine). Važno je pravilno i kontinuirano filtriranje SHIP-a kako bi se izbjeglo oštećenje površine obratka uslijed udara stranih čestica u visokotlačnom mlazu. Veličina zagađivača u SHIP-u ne smije prelaziti 20 μm [44]. Osnovni nedostatak ove metode su veliki troškovi ulaganja.



Slika 3.2. Usporedba djelovanja slobodnog i visokotlačnog mlaza SHIP-a. v_c brzina rezanja

3.2. Vrste SHIP-ova

Smatra se da je W. H. Northcott autor najstarijeg objavljenog rada (1868.) u kojem se spominje SHIP pri čemu je naveo [60]: "Tekućine za podmazivanje su različite. Ulje je dobro, ali skupo; sapunica se također puno koristi; ali možda je otopina obične sode u vodi jednako dobra i jeftina kao bilo što drugo. Malo prljavog ulja, ili ulja koje prolazi kroz ležajeve, može se pogodno miješati s vodenom otopinom sode. Voda, ako se koristi sama, uzrokovala bi pokrivanje obratka i tokarilice hrđom pola sata nakon uporabe; dodavanje sode ne samo da omekšava vodu, već u velikoj mjeri sprečava hrđanje metalnih površina." F. W. Taylor je 1883. eksperimentima dokazao važnost vode kao baze za SHIP. Dovođenjem konstantnog mlaza vode direktno na korijen strugotine postigao je porast brzine rezanja i stoga produktivnosti za 30 – 40 %. To je već sljedeće godine dovelo do izrade prvih alatnih strojeva za uporabu s recirkulacijskim sustavom za hlađenje zone rezanja i središnjim spremnikom vodene otopine sode [79]. U 20. st. je SHIP tehnologija brzo napredovala, posebno s pojavom emulgirajućih ulja dobre kvalitete 1920-tih i sintetičkih ulja kasnih 1950-tih. Razvoj aditiva za maziva izvrsnih svojstava rezultirao je SHIP-ovima složenih kemijskih sastava koji se značajno razlikuju ovisno o specifičnim zahtjevima proizvodnih postupaka.

Norme ISO 6743-7:1986(E) [39] i DIN 51385:2013 [24] svrstavaju SHIP-proizvode na tržištu u dvije skupine. Prvu skupinu čine *reznna ulja* koja se direktno primjenjuju i imaju prevladavajuće svojstvo podmazivanja, a drugu *vodomješljive tekućine (koncentrati)* koje potrošač razrjeđuje neposredno prije uporabe i imaju prevladavajuće svojstvo hlađenja. Pri formuliranju SHIP-a koriste se različiti funkcionalni aditivi: polarni, za zaštitu alata od

trošenja (AW; engl. *antiwear*), za ekstremno visoke tlakove (EP; engl. *extreme pressure*), emulgatori, inhibitori korozije, antipjenušavci, biocidi i dr.

Rezna ulja se sastoje od baznog ulja (70 – 99 %) obogaćenog aditivima i ne miješaju se s vodom. Bazna ulja su uglavnom mineralna (parafinska, naftenska i dr.), a često im se dodaju i prirodna ulja – biljna i životinjska. Iako su rezna ulja manje popularna nego su bila u prošlosti, ona su još uvijek prvi izbor za određene postupke obrade (provlačenje, honanje, izrada ozubljenja i rezanje zahtjevnih navoja).

Vodomješljive tekućine se mogu *disperzirati* u vodi ili mogu biti *topljive* u vodi. Priređene radne tekućine dijele se na *mliječne emulzije* (disperzirane kapljice ulja promjera 1 – 10 μm u kontinuiranoj fazi vode), čiji koncentracije sadrže 60 – 85 % mineralnog ulja, *poluprozirne polusintetičke mikroemulzije* (promjer kapljica ulja 0,01 – 0,1 μm), čiji koncentracije sadrže 5 – 30 % mineralnog ulja i *prozirne sintetičke otopine*, čiji koncentracije ne sadrže mineralno ulje. Od svih vrsta SHIP-ova, emulzije se najviše koriste.

Sastavi SHIP-ova na tržištu se značajno razlikuju između proizvođača. Sažetak osnovnih sastava u tablici 3.1 dan je samo u svrhu ilustriranja razlika između vrsta SHIP-ova. U tablici 3.2 uspoređena su svojstva različitih vrsta SHIP-ova uz navođenje važnijih nedostataka.

Tablica 3.1. Vrste i osnovni sastav SHIP-ova

| Sastav | Rezna ulja | Vodomješljive tekućine (koncentracije) | | |
|--------------------------------------|----------------------|--|------------------------------|--------------------|
| | | Na osnovi emulgirajućeg ulja | Polusintetičke | Sintetičke |
| Mineralno ulje, % | 70 – 99 | 60 – 85 | 5 – 30 | - |
| AW/EP aditivi, % | < 25 | < 5 | < 15 | < 10 |
| Emulgatori, % | - | 10 – 20 | 20 – 40 | - |
| Inhibitori korozije, % | < 5 | 5 – 15 | 5 – 40 | 15 – 40 |
| Ostali aditivi, % | < 5 | < 5 | < 10 | < 5 |
| Voda, % | - | - | 30 – 50 | < 60 |
| Radne tekućine | Ne-emulgirajuća ulja | Emulzije (mliječne) | Mikroemulzije (poluprozirne) | Otopine (prozirne) |
| Promjer kapljica ulja, μm | - | 1 – 10 | 0,01 – 0,1 | - |
| Omjer razrjeđivanja | Ne razrjeđuje se | 1 : (5 – 40) | 1 : (10 – 40) | 1 : (10 – 40) |

Tablica 3.2. Usporedba vrsta SHIP-ova (● – prikladan, ○ – neprikladan)

| Svojstva | Rezna ulja | Emulzije | Polusintetičke mikroemulzije | Sintetičke otopine |
|----------------------|---|--|---|--|
| Podmazivanje | ●●● | ●● | ● | ○ |
| Hlađenje | ○ | ●● | ●●● | ●●● |
| Odvođenje strugotine | ●●● | ●● | ● | ○ |
| Korozijska zaštita | ●●● | ●● | ●● | ●● |
| Bakterijska kontrola | ●●● | ● | ●● | ●●● |
| Zapaljivost | Opasnost | Ne | Ne | Ne |
| Važniji nedostaci | Ograničenost na niske brzine rezanja, stvaranje magle ili dima, visoka cijena | Gubici isparavanja, visoki troškovi održavanja | Sklonost pjenjenju, na stabilnost utječe tvrdoća vode, lako kontaminiranje drugim strojnim tekućinama | Lako kontaminiranje drugim strojnim dijelovima |

3.3. Ekološki, zdravstveni i ekonomski aspekti SHIP-a

Primjena SHIP-a otvara brojna ekološka pitanja. Promatrajući gubitke kao što su isparavanje, prskanje, nekontrolirano istjecanje i zaostale količine na obratku i strugotini, može se ustanoviti kako gotovo 30 % od ukupne godišnje potrošnje SHIP-ova dopijeva iz obradnog sustava u okoliš [19]. Doprinos SHIP-a potencijalno štetnim utjecajima na okoliš sažeto je prikazan na slici 3.3.

**Slika 3.3.** Diseminacija SHIP-a u okoliš

Poseban je problem zbrinjavanje otpadnih SHIP-ova. Isti se prema Odluci Europske komisije o popisu otpada 2000/532/EZ [92] svrstavaju u opasan otpad te ih je potrebno sigurno zbrinuti na način kojim se ne ugrožava zdravlje ljudi i ne šteti okolišu (Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i vijeća [25]). Prolijevanje otpadnog SHIP-a kao i ispuštanje u kanalizaciju ili u sustav odvodnje oborinske vode može onečistiti tlo i kontaminirati podzemne vode, rijeke, jezera ili more. Pravilno zbrinjavanje podrazumijeva recikliranje ili spaljivanje kao gorivo.

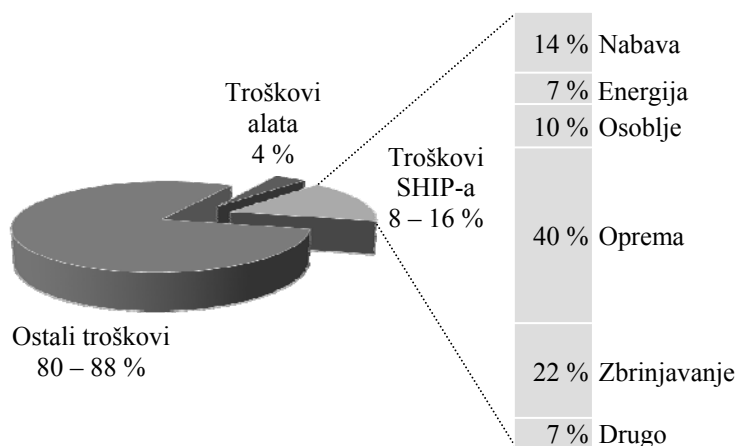
Rukovanje SHIP-om predstavlja rizik za zdravlje čovjeka i mogućnost obolijevanja od različitih bolesti. Pogled na uzroke kožnih bolesti u metalnom sektoru pokazuje da SHIP-ovi imaju posebno važnu ulogu. Prema publikaciji Udruge za naknadu šteta metalaca (Arbeitsgemeinschaft der Metallberufsgenossenschaften), oni su glavni uzrok u 37 % ispitanih slučajeva [90]. Direktna doticaj kože radnika sa SHIP-om dovodi do gubitka sebuma, prirodnog ulja u koži koji izlučuju žlijezde lojnice. Uz lužnatost SHIP-a ($\text{pH} > 9$), dodatne opasnosti predstavljaju bakterijska i gljivična oboljenja, alergije uzrokovane aditivima, mikro ozljede uzrokovane strugotinom i mekana koža kao posljedica vlažne okoline. Slika 3.4 prikazuje ruke zahvaćene SHIP-om uzrokovanim dermatitisom. Također, udisanje aerosola iz ovih tekućina izaziva maligne i nemaligne bolesti respiratornog sustava.



Slika 3.4. Fotografija ruku zahvaćenih SHIP-om uzrokovanim dermatitisom koja pokazuje suhu ljuskavu i ispucanu kožu [82]

Procjena je da troškovi povezani sa SHIP-ovima iznose približno 16 % ukupnih troškova proizvodnje (slika 3.5), dok kod obrade teško obradivih materijala oni dostižu 20 – 30 % [67]. To je mnogo više od troškova alata koji iznose samo 2 – 4 % ukupnih troškova proizvodnje. Troškovi povezani sa SHIP-ovima nisu ograničeni samo na njihovu nabavu i pripremu, već

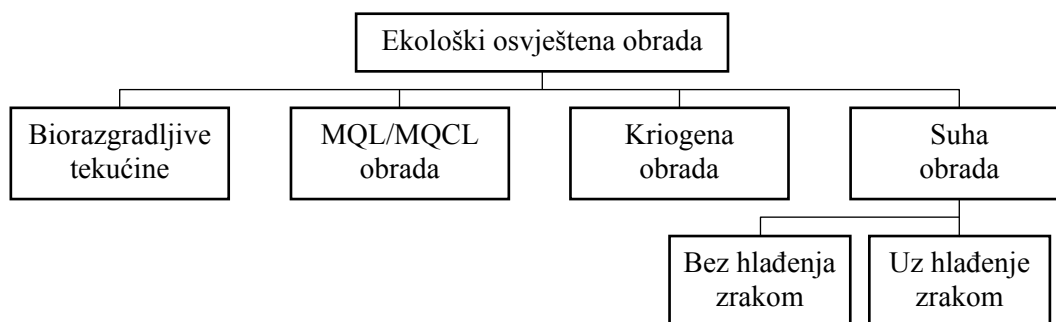
uključuju i troškove održavanja te zbrinjavanja. Troškovi zbrinjavanja otpadnih SHIP-ova mogu u nekim slučajevima biti i preko četiri puta veći od njihove nabavne cijene, uglavnom, zbog činjenice da većina SHIP-ova nije prirodno biorazgradiva, što onda zahtijeva poseban (skupi) tretman [36].



Slika 3.5. Troškovi primjene SHIP-a kod konvencionalne mokre obrade metala rezanjem

3.4. Alternativne tehnike hlađenja i podmazivanja

Osim troškova, briga za zdravlje čovjeka i razvoj ekološke svijesti kao i sve stroži zakonski propisi prisiljavaju proizvodna poduzeća na drastično smanjenje potrošnje SHIP-ova i, ako je moguće, potpuno napuštanje njihove uporabe. *Ekološki prihvatljiva obrada* ili *održiva proizvodnja* ili *zelena proizvodnja* sinonimi su za suvremenu proizvodnu strategiju s krajnjim ciljem minimiziranja potrošnje resursa i utjecaja na okoliš poput otpada i onečišćenja tijekom životnog ciklusa proizvoda s težištem na SHIP-ove kao jedne od glavnih onečišćivača. Za smanjivanje ekološkog opterećenja kojeg donosi primjena SHIP-ova odnosno *mokra* obrada (engl. *wet machining*), na raspolaganju su različiti pristupi: primjena biorazgradljivih tekućina, primjena minimalne količine SHIP-a, kriogena obrada i suha obrada, slika 3.6.



Slika 3.6. Pristupi za postizanje ekološki prihvatljive obrade

Osnovni sastojak većine SHIP-ova su mineralna ulja koja se izdvajaju iz sirove nafte i čija je biorazgradivost jako niska. Zato se sve više potiče uporaba **biljnih** baznih ulja i **sintetičkih** baznih ulja (esteri) koja su biorazgradiva, ali i skuplja. Moguća primjena ovih BIO SHIP-ova je široka, a ovisi o zahtjevima operacije obrade, metodi dovođenja u zonu obrade i ekološkoj svijesti potrošača.

Primjena minimalne količine SHIP-a podrazumijeva uporabu ekstremno malih količina, tipično reda veličine 5 – 50 ml/h s potrošnjom gotovo bez ostatka umjesto nekoliko l/min kao što je to slučaj kod mokre obrade, vrlo fine disperzije kapljevine u struji komprimiranog zraka ili jednostavnije u obliku *aerosola*. Dovođenje aerosola u zonu obrade može biti vanjsko pomoću posebnih mlaznica ili unutrašnje kroz radno vreteno i kanale u alatu. Ovisno o vrsti i primarnoj zadaći dovedene tekućine uobičajeno se izvodi razlika između **podmazivanja minimalnom količinom** – MQL (engl. *Minimum Quantity Lubrication*) kada se koriste biorazgradiva ulja odnosno **rashladnog podmazivanja minimalnom količinom** – MQCL (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*) kada se koriste emulzije. Napredni sustavi koriste aerosol koji osim ulja uključuje i neke druge komponente. Ovdje se navode dva primjera. Prvi je napredni MQL sustav zasnovan na koncepciji tankog uljnog filma na kapljici vode (engl. *Oil-on-Water* – OoW). Kada kapljica dosegne alat ili vruću obrađivanu površinu, ulje za podmazivanje širi se površinom prije širenja vode. Od kapljica vode se očekuje obavljanje tri zadatka: nošenje ulja za podmazivanje, učinkovito širenje ulja preko površine zbog inercije i povećanje učinka hlađenja površine zbog njihove visoke specifične topline i isparavanja [28]. Drugi primjer je napredni MQCL sustav koji kombinira izvor potisnog plina (tj. komprimirani zrak), aditive za podmazivanje (tj. sojino ulje) i ugljični dioksid (CO₂) u krutom (suhi led) i/ili plinovitom stanju (tj. rashladno sredstvo) u različitim koncentracijama za dobivanje široko podesivog aerosola [4]. Smanjena potrošnja SHIP-a, osim smanjenja troškova za njegovu nabavu, pripremu, održavanje i zbrinjavanje, također smanjuje opasnost za zdravlje uzrokovanu emisijama tekućine kroz udahnuti zrak i na koži radnika. SHIP se ne prelijeva i ne prska oko alatnog stroja što pridonosi manjem onečišćenju radnog mjesta i neposredne okoline. Ekstremno smanjenje količine SHIP-a rezultira gotovo suhim radnim komadima i strugotinom zbog čega se MQL/MQCL obrada u literaturi često naziva i *gotovo suha obrada* (engl. *near-dry machining*).

Općenito se izraz "kriogeno" odnosi na tekućine koje imaju vrelište niže od -150 °C. Prema ovoj definiciji, kriogene tekućine uključuju ukapljene plinove zraka, dušika, argona, kisika,

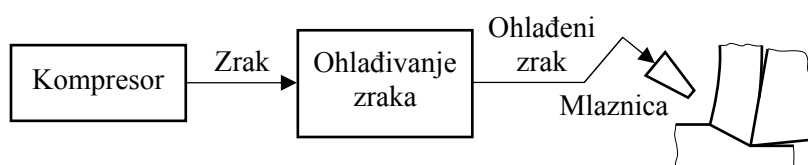
vodika i helija. **Kriogena obrada** (engl. *cryogenic machining*) podrazumijeva uporabu kriogenih tekućina umjesto konvencionalnih. *Tekući dušik* (LN₂; -196 °C) smatra se jednim od najprihvatljivijih rješenja kriogene obrade. Dušik je kemijski inertan plin bez boje, okusa i mirisa. Nadalje, dušik je nezapaljiv i ne izaziva koroziju. Tekući dušik apsorbira toplinu u zoni rezanja brzim isparavanjem u atmosferu (volumni udio dušika u zraku je 78,1 %) ne ostavljajući nikakve kontaminirane ostatke na obratku, strugotini, alatnom stroju ili radniku. Također, u kriogenu je obradu uključen i tekući ugljični dioksid (CO₂; -78,5 °C) kao medij za hlađenje iako tehnički nije kriogena tekućina, ali se zbog jednostavnosti takvom smatra u publikacijama za obradu metala. Osnovni nedostatak kriogene obrade je visoka cijena sustava i njegovog održavanja. Izrazito niske temperature ukapljenih plinova predstavljaju potencijalnu opasnost za čovjeka. Prilikom rukovanja i uporabe može doći do teških smrztina pa je obvezno korištenje zaštitnih sredstava.

Kod **suhe obrade** (engl. *dry machining*) izostaju pozitivni učinci SHIP-a: apsorpcija generirane topline, smanjivanje trenja i ispiranje (odvođenje) strugotine. Zamjena za tri navedene funkcije nije jednostavna. Za primjenu suhe obrade treba imati nove materijale reznog alata, nove prevlake, drukčiju tj. prikladnu reznu geometriju i novi koncept alatnog stroja. U ovom trenutku, rezni materijali pružaju najbolji temelj za suhu obradu. Tvrdi metali, kermeti, rezne keramike, kubični bor nitrid (CBN) i polikristalni dijamant (PCD) posjeduju dovoljnu otpornost trošenju na povišenim temperaturama koje se pojavljuju kod suhe obrade. U tom su pogledu posebno važne prevlake za alate od tvrdih metala jer smanjuju toplinsko opterećenje na osnovni materijal te trenje i adheziju između materijala obratka i alata. Razlikuju se dva postupka nanošenja prevlake: kemijsko nanošenje iz parne faze (engl. *Chemical Vapour Deposition* – CVD) i fizikalno nanošenje u vakuumu (engl. *Physical Vapour Deposition* – PVD). Prevlake mogu biti jednoslojne i višeslojne. S tehnološkog aspekta broj slojeva je neograničen, no debljina prevlake povećava polumjer reznog ruba. S obzirom da je oštri rezni rub od posebne važnosti za primjenu suhe obrade, prednost imaju izrazito tanke prevlake. Nanoslojne prevlake koje predstavljaju dostignuće moderne tehnologije mogu sadržavati i do sto pojedinačnih slojeva pri čemu ukupna debljina nije veća od 2 – 5 μm. Postoji posebna vrsta PVD prevlaka namijenjenih za suhu obradu koje djelomično nadomještavaju funkciju podmazivanja (samopodmazivanje alata). Kod ovih se prevlaka gornji, podmazujući slojevi, tipično od MoS₂ ili WC+C, nanose se na prethodne vrlo tvrde slojeve, primjerice od TiAlN ili TiCN. Suha obrada je ekološki prihvatljiva i neškodljiva za zdravlje, ali mogućnost njezine primjene bitno ovisi o postupku obrade metala

rezanjem i materijalu obratka [46]. Implementiranje *hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom* (engl. *cold compressed air cooling*) u suhu obradu donosi značajno povećanje postojanosti alata i produktivnosti u odnosu na suhu obradu bez njega. Također, postiže se povećanje kvalitete obrađene površine i smanjenje zaostalih naprezanja unutar iste [20].

3.5. Hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom

Primjena hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom može kod suhe obrade zamijeniti dvije od tri temeljne funkcije SHIP-a: hlađenje i odvođenje strugotine iz zone rezanja. U sustavima ohlađenog komprimiranog zraka, zrak se na putu prema zoni rezanja prisilno ohladi čime se poveća njegov kapacitet hlađenja, slika 3.7.



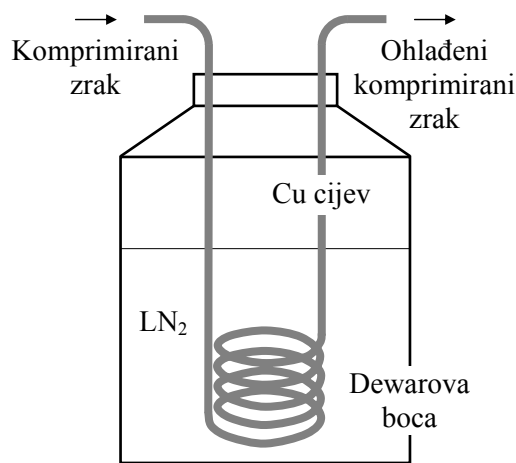
Slika 3.7. Sustav ohlađenog komprimiranog zraka

Eksperimentalna istraživanja [13, 20] izdvajaju hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom kao jednu od učinkovitijih tehnika za hlađenje u obradi metala rezanjem. Zrak kao rashladni medij je potpuno prirodan pa je ova tehnika hlađenja najčišća i ekološki najprihvatljivija [26]. Za razliku od tekućina komprimirani zrak lakše prodire do kontaktnih površina alata u zoni rezanja. Osim hlađenja, mlaz zraka otpuhuje strugotinu. Glavni je nedostatak nepostojanje funkcije podmazivanja, ali se ona može djelomično nadomjestiti izborom odgovarajućih alata sa samopodmazujućim prevlakama.

Za ohlađivanje komprimiranog zraka mogu se za primjenu u obradi metala rezanjem izdvojiti dvije metode: kriogeno hlađenje komprimiranog zraka i vrtložna cijev.

Metoda **kriogenog hlađenja komprimiranog zraka** je sposobna generirati visoke brzine protoka zraka s vrlo niskom temperaturom [76]. Hladni zrak dobiva se propuštanjem komprimiranog zraka kroz izmjenjivač topline (svitak bakrene cijevi) uronjen u Dewarovu bocu koja sadrži tekući dušik, slika 3.8. Nažalost, za hlađenje se troši 33 % više od potrošnje energije tradicionalnom mokrom obradom i 28 % više od MQL obrade [32]. Dakle, dok se s

jedne strane izbjegavaju problemi s uporabom konvencionalnog SHIP-a, s druge se povećava emisija stakleničkih plinova odnosno ugljikov otisak (engl. *carbon footprint*).

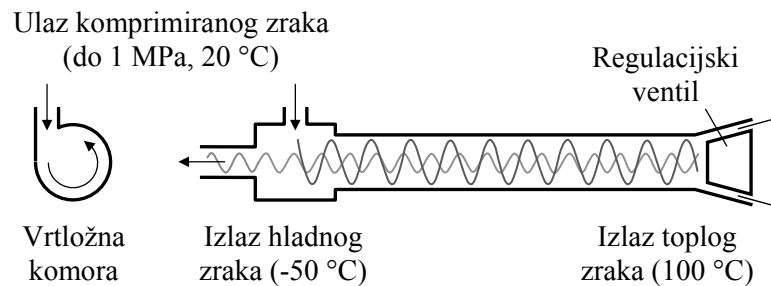


Slika 3.8. Kriogeno hlađenje komprimiranog zraka (shema)

Prvi je zapis o **virtložnoj cijevi** zabilježen 12. prosinca 1931. kada je Georges Joseph Ranque podnio zahtjev za francuskim patentom svojeg slučajnog otkrića. Ipak, virtložna cijev je postala široko poznata tek 1946. kada je njemački fizičar Rudolf Hilsch objavio rad u kojem opisuje unaprijeđene konstrukcijske detalje. Zbog toga se često naziva i Ranque-Hilsch virtložna cijev.

Vrtložna cijev je jednostavna naprava bez pokretnih dijelova koja komprimirani zrak istovremeno dijeli u dva vrtložna strujanja i to s višom i nižom temperaturom od ulazne. Na slici 3.9 prikazana je vrtložna cijev *protusmjernog protoka*. Komprimirani zrak se tangencijalno uvodi u vrtložnu komoru cijevi kroz jednu ili više mlaznica, ubrzava do velike frekvencije vrtnje (i do 10^6 s^{-1}) i usmjerava niz cijev. Zbog centrifugalne sile zrak se prema regulacijskom ventilu na toplom kraju cijevi kreće njezinim obodnim područjem. Regulacijski ventil propušta manji dio vrtložne struje zraka uz samu stjenku cijevi dok se ostatak odbija kroz središnje područje cijevi u suprotnom smjeru. Na svojem putu unutarnja vrtložna struja zraka predaje toplinu vanjskoj i uz značajan pad temperature izlazi na hladnom kraju cijevi. Hladna struja zraka može dostignuti temperaturu i do $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ dok topla struja zraka može postići temperaturu od $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Postoji i izvedba vrtložne cijevi s istosmjernim protokom obje struje zraka, ali je njezina učinkovitost niža. Fenomen razdiobe protoka zraka u dva temperaturna područja poznat je kao Ranque-Hilsch učinak. Iako postoje brojne numeričke i

eksperimentalne analize ovog učinka, još ne postoji jedinstveno fizikalno objašnjenje pojave radijalnog temperaturnog razdvajanja u vrtložnoj cijevi.



Slika 3.9. Načelo rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka (shema)

Visoka primjenjivost vrtložne cijevi temelji se na njezinoj jednostavnosti, niskim investicijskim troškovima, kompaktnosti, maloj masi i izrazito tihom načinu rada. Budući da ne sadrži nikakve pokretne dijelove, vrtložna cijev ne puca niti je podložna trošenju što je čini jednostavnom za održavanje. Osim za hlađenje zone rezanja, vrtložna cijev može se upotrebljavati i za hlađenje visokobrzinskih motorvretena CNC alatnih strojeva [48]. Za njezin je rad potreban samo komprimirani zrak kojeg obično posjeduje svaki proizvodni pogon, pri čemu treba uzeti u obzir da je zbog visokog protoka zraka potreban kompresor velikog kapaciteta. Ne manje važno, u usporedbi s tradicionalnom mokrom obradom i MQL obradom, primjena hlađenja vrtložnom cijevi pokazuje značajno smanjenje ugljikovog otiska, redosljedno za -42 % i -30 % [31].

4. KOROZIJA I OBRADIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

4.1. Nehrđajući čelici

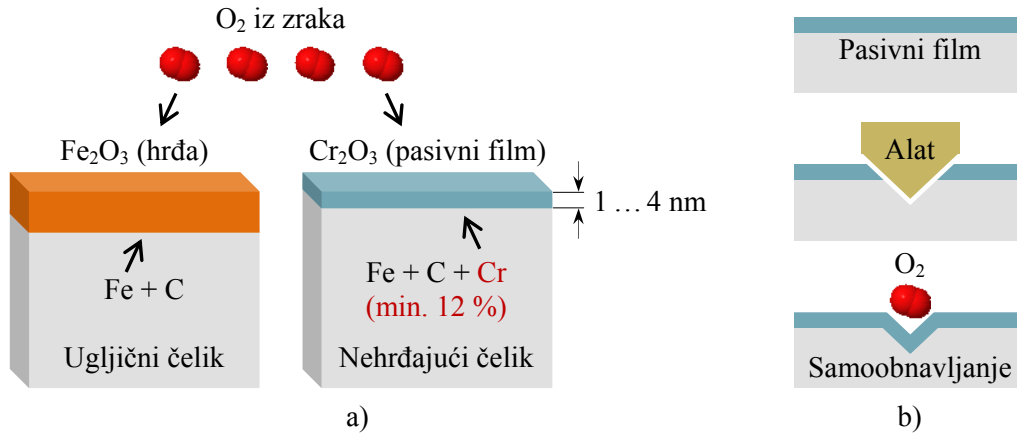
Europska norma EN 10088-1:2014 (CEN) [29] definira nehrđajuće čelike kao slitine željeza koje sadrže barem 10,5 % kroma i najviše 1,2 % ugljika. Međutim, u gotovo svim nehrđajućim čelicima dostupnim na tržištu je sadržaj kroma veći. To je zbog činjenice da je u praksi potreban **sadržaj kroma od najmanje 12 %** koji u potpunosti mora biti otopljen u metalnoj osnovi (kristalu mješancu) kako bi se dobila zadovoljavajuća korozijska otpornost čelika u vodenim otopinama. Ovo je prvi, nužan uvjet antikorozivnosti. Danas postoje nehrđajući čelici koji sadrže i do 33 % kroma.

Drugi uvjet antikorozivnosti je monofazna mikrostruktura. Naime, čelici otporni na koroziju bi teorijski morali imati potpuno feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu, bez karbida, oksida, ili drugih intermetalnih faza kako bi se izbjegla opasnost od nastanka galvanskih članaka koji u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala. Ovaj uvjet ne mora biti nužno ispunjen. Većina nehrđajućih čelika ima monofaznu mikrostrukturu, ali postoje i oni čiju mikrostrukturu čine dvije i više faza [70].

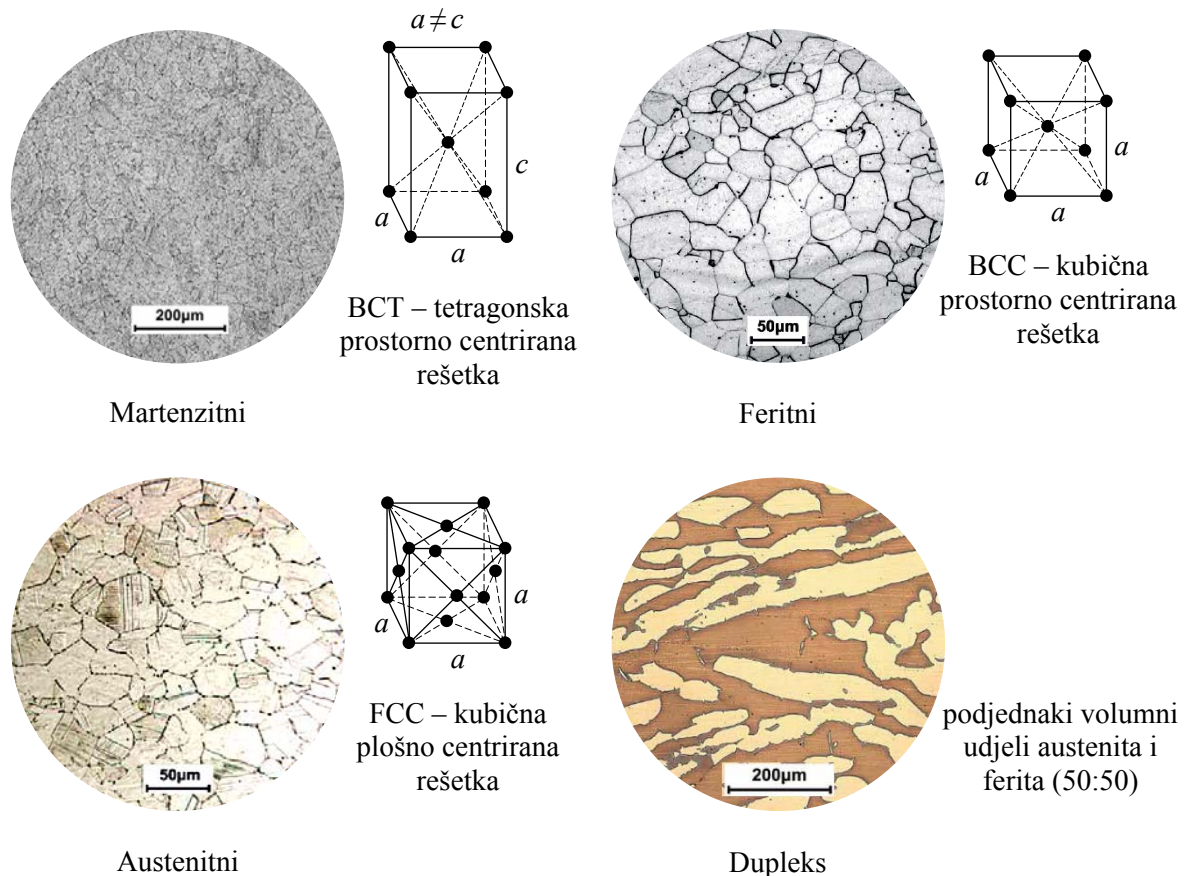
U medijima koji sadrže dovoljno kisika (npr. zrak) prisutnost kroma osigurava mogućnost spontanog stvaranja vrlo tankog sloja oksida (debljine nekoliko nanometara) na čeličnoj površini, poznatog kao **pasivni film**, slika 4.1a. Ovaj čvrsto prijanjajući, netopljivi i kompaktni film koji se uglavnom sastoji od kromovog oksida Cr_2O_3 djeluje kao barijera između površine na kojoj se formira i korozivne sredine. Dodatno, s obzirom na prirodu i spontano formiranje, pasivni film ima i važno svojstvo samoobnavljanja. Kada se ogrebe ili mehanički ukloni s površine (npr. postupcima obrade metala rezanjem), u sredinama s dovoljno kisika će se gotovo trenutno sam obnoviti i tako vratiti zaštitu od korozivnog djelovanja, slika 4.1b.

Najčešći kriterij podjele nehrđajućih čelika je njihova mikrostruktura na sobnoj temperaturi. Tako se nehrđajući čelici mogu podijeliti u četiri osnovne skupine: **martenzitni**, **feritni**, **austenitni** i **dupleks** (austenitno-feritni), slika 4.2. Navedena se podjela može proširiti ako se uzme u obzir i mogućnost očvršćivanja pa tako postoji još jedna posebna skupina, a to su

precipitacijski očvršnuti (engl. *Precipitation Hardening* – PH) nehrđajući čelici. Ovi čelici nisu definirani mikrostrukturom, već mehanizmom toplinske obrade/očvršnuća koji se koristi za njihovu proizvodnju. Mogu biti martezitni, poluaustenitni i austenitni.



Slika 4.1. Pasivni film na površini nehrđajućih čelika. a) mehanizam pasivacije u kontaktu sa zrakom, b) mehaničko uklanjanje pasivnog filma i spontana repasivacija



Slika 4.2. Primjeri mikrostruktura nehrđajućih čelika (mikrografija: [10])

Nehrđajući čelici osim kroma sadrže i druge legirne elemente koji izravno ili utjecajem na mikrostrukturu poboljšavaju njihova korozijska i mehanička svojstva (čvrstoća, žilavost i dr.). Svi legirni elementi mogu se podijeliti u dvije skupine. Jedni promiču ferit (**alfageni elementi ili feritotvorci** – uz *krom* kao najjači to su još *molibden, silicij, titan, niobij, aluminij, vanadij i volfram*), a drugi promiču ili stabiliziraju austenit (**gamageni elementi ili austenotvorci** – uz *nikal* kao najjači to su još *mangan, dušik, bakar i kobalt*). Martenzitna mikrostruktura nastaje transformacijom austenita naglim hlađenjem (gašenjem) s odgovarajuće temperature. Ako nema austenita na visokoj temperaturi nema ni martenzita na niskoj temperaturi. Tako omjer alfagenih i gamagenih legirnih elemenata utječe i na stabilnost martenzitne mikrostrukture [70].

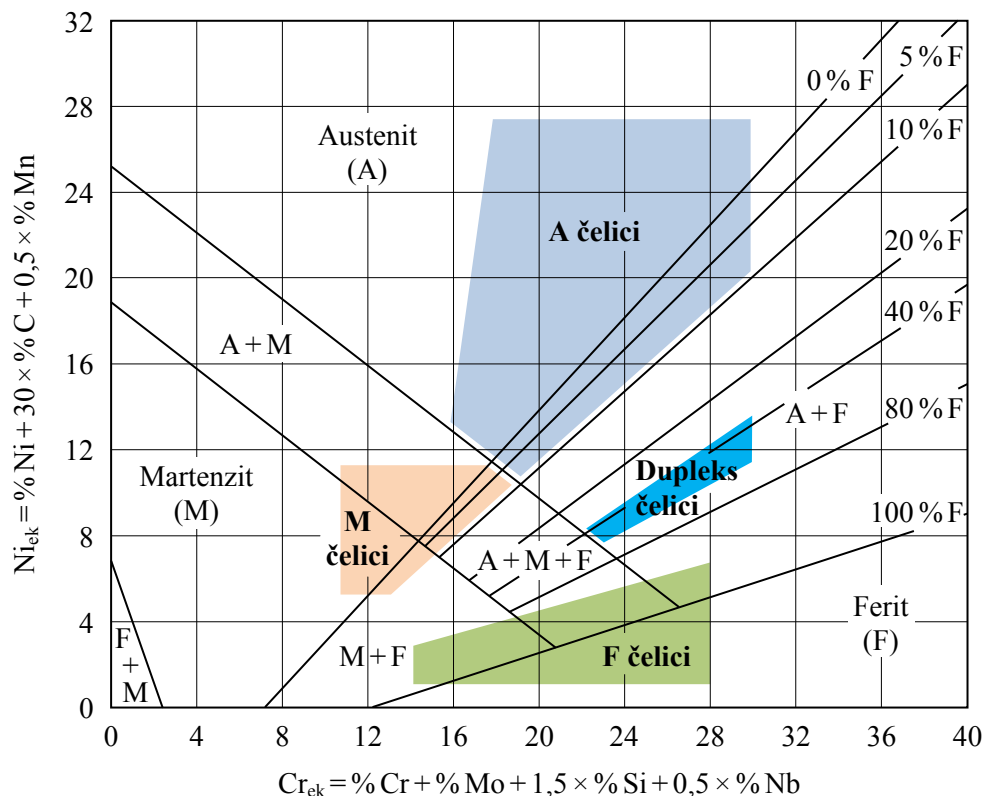
Iako se *ugljik* ne smatra legirnim već sastavnim elementom nehrđajućih čelika, njegova je uloga jako važna. Osim što pridonosi povećanju čvrstoće i osigurava zakaljivost, ugljik je gamageni element pa stabilizira austenitnu mikrostrukturu. Međutim, ako se poveže u štetni kromov karbid Cr_{23}C_6 dolazi do pada korozijske otpornosti zbog lokalnog smanjenja koncentracije kroma dostupnog za stvaranje pasivnog filma. Zato je poželjan **što niži sadržaj ugljika i što viši sadržaj kroma** [30]. Izuzetak su martenzitni čelici gdje ga mora biti više zbog njihove povišene čvrstoće i tvrdoće.

Neke se primjese mogu dodati nehrđajućim čelicima zbog vrlo specifičnih zahtjeva. Tako npr. *sumpor* poboljšava njihovu obradivost, omogućuje višu brzinu rezanja i produljuje vijek alata. S druge strane, njegovim dodatkom jako pada korozijska otpornost.

S obzirom na kemijski sastav, nehrđajući čelici se svrstavaju u sljedeće skupine: krom, krom-nikal, krom-nikal-molibden i krom-mangan čelici. Svi austenitni i dupleks nehrđajući čelici sadrže nikal. Dobar uvid u postizivu mikrostrukturu na temelju poznatog kemijskog sastava (tablica 4.1) daje Schaefflerov strukturni dijagram kome je na x -osi krom-ekvivalent Cr_{ekv} (obuhvaća utjecaj alfagenih elemenata), a na y -osi nikal-ekvivalent Ni_{ekv} (obuhvaća utjecaj gamagenih elemenata), slika 4.3. U dijagramu su istaknuta područja smještaja martenzitnih, feritnih, austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika.

Tablica 4.1. Osnovne skupine nehrđajućih čelika s nekim primjerima

| EN oznaka čelika (EN broj) | Osnovni i ostali značajni elementi, % | | | | Značajke skupine |
|---|---------------------------------------|-------------|------------|----------------------------------|---|
| | C | Cr | Ni | Ostali | |
| <i>Martenzitni nehrđajući čelici</i> | | | | | |
| X15Cr13 (1.4024) | 0,12 – 0,17 | 11,5 – 13,5 | - | - | Magnetični Mogu se toplinski očvrnuti |
| X20Cr13 (1.4021) | 0,16 – 0,25 | 12 – 14 | - | - | Niža korozivska otpornost u odnosu na druge skupine |
| <i>Feritni nehrđajući čelici</i> | | | | | |
| X6Cr17 (1.4016) | ≤ 0,08 | 16 – 18 | - | - | Magnetični Ne mogu se toplinski očvrnuti |
| X2CrMoTi18-2 (1.4521) | ≤ 0,025 | 17 – 20 | - | Mo: 1,8 – 2,5 Ti: 0,15 – 0,8 | Srednja korozivska otpornost |
| <i>Austenitni nehrđajući čelici</i> | | | | | |
| X12CrMnNiN17-7-5 (1.4372) | ≤ 0,15 | 16 – 18 | 3,5 – 5,5 | Mn: 5,5 – 7,5 | Nemagnetični Ne mogu se toplinski očvrnuti |
| X5CrNi18-10 (1.4301) | ≤ 0,07 | 17 – 19 | 8 – 10,5 | - | Mogu se (značajno) očvrnuti hladnom deformacijom |
| X5CrNiMo17-2-2 (1.4401) | ≤ 0,07 | 16,5 – 18,5 | 10 – 13 | Mo: 2 – 2,5 | Visoka korozivska otpornost |
| <i>Dupleks nehrđajući čelici</i> | | | | | |
| X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) | ≤ 0,030 | 21 – 23 | 4,5 – 6,5 | Mo: 2,5 – 3,5 | Magnetični Ne mogu se toplinski očvrnuti |
| X2CrNiN23-4 (1.4362) | ≤ 0,030 | 21,5 – 24,5 | 3 – 5,5 | Cu: 0,05 – 0,6 | Vrlo visoka korozivska otpornost |
| <i>Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici</i> | | | | | |
| X4CrNiCuNb16-4 (1.4540) | ≤ 0,07 | 14,0 – 15,5 | 3,5 – 5,5 | Cu: 2,5 – 4,5 Nb: 0,15 – 0,45 | Magnetični Mogu se toplinski očvrnuti |
| X7CrNiAl17-7 (1.4568) | ≤ 0,09 | 16,0 – 18,0 | 6,5 – 7,75 | Al: 0,7 – 1,5 | Srednja korozivska otpornost |



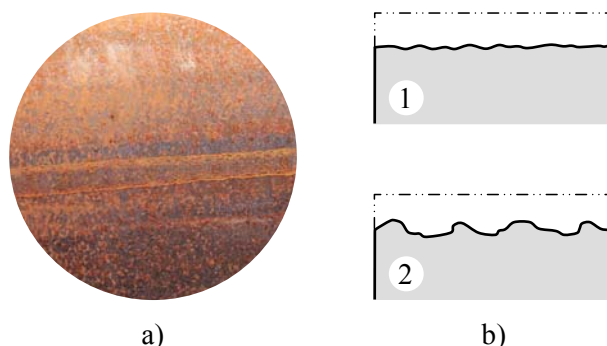
Slika 4.3. Karakteristična područja smještaja skupina nehrđajućih čelika u Schaefflerovom dijagramu

4.2. Morfologija korozije nehrđajućih čelika

Korozija je fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i njegovog okoliša koje uzrokuje promjenu uporabnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji on čini (norma HRN EN ISO 8044:2015 [38]). Korozija će nastati samo ako između reaktanata (metala i okoline) postoji afinitet, a koji je kvantitativno izražena težnja nekih tvari da međusobno spontano reagiraju [65]. Prema **mehanizmu** procesa korozija metala se dijeli na *kemijsku* koja se događa u neelektrolitima i *elektrokemijsku* koja se događa u elektrolitima. Pojavni **oblici** korozije su: a) *opća* korozija (ravnomjerna ili neravnomjerna) koja zahvaća čitavu izloženu površinu metala i b) *lokalna* (mjestimična) korozija.

Opća korozija je najčešći i najrašireniji, ali i najmanje opasan oblik korozije i često se kolokvijalno naziva "hrđanje" [49]. Da bi se opća korozija pojavila kod nehrđajućih čelika, pasivni se film mora razoriti na cijelom ili velikom dijelu površine. To se može dogoditi u agresivnim sredinama kao što su kiseline (osobito klorovodična) ili alkalne otopine (npr. natrijevog hidroksida) na povišenim temperaturama. Rezultat je više ili manje jednoliko

uklanjanje metala s nezaštićene površine, slika 4.4. Nehrđajući čelici se normalno smatraju otpornima na opću koroziju u određenoj sredini ako brzina korozije ne prelazi 0,1 mm godišnje [62]. Stupnjevi otpornosti čelika na opću koroziju navedeni su u tablici 4.2.



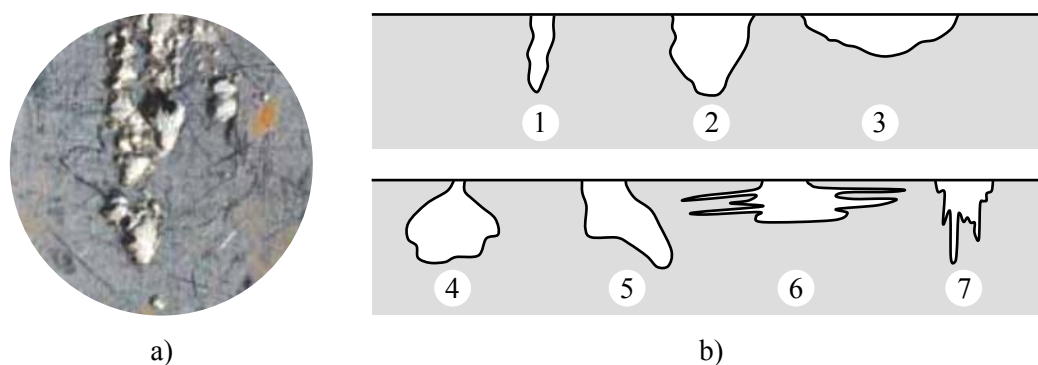
Slika 4.4. Opća korozija. a) detalj, b) sheme tipičnih morfologija degradacije metala (1 - ravnomjerna, 2 - neravnomjerna)

Tablica 4.2. Stupnjevi otpornosti čelika na opću koroziju [30]

| Stupanj otpornosti | Opis otpornosti | Gubitak mase, $\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$ | Smanjenje debljine, mm/god. |
|--------------------|---------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Potpuna | < 0,1 | < 0,11 |
| 1 | Praktički postojano | 0,1 – 1 | 0,11 – 1,1 |
| 2 | Slabo postojano | 1 – 10 | 1,1 – 11 |
| 3 | Nepostojano | > 10 | > 11 |

Opću koroziju je lako uočiti jer se odvija preko cijele površine metala. Suprotno, lokalnu koroziju je teško predvidjeti i kontrolirati jer se odvija na mikro razini i često je povezana s teško dostupnim dijelovima metala. Nehrđajući čelici podložni su nekim oblicima lokalne korozije od kojih su najčešći *rupičasta* i *napetosna* korozija.

Rupičasta korozija (engl. *pitting corrosion*) smatra se jednim od najopasnijih pojava oblika korozije nehrđajućih čelika. Kako i sam naziv upućuje prepoznatljiva je po rupicama (jamicama) koje sporadično nastaju na površini i protežu se u dubinu metala, slika 4.5. Materijalna šteta je mnogo veća nego kod opće korozije jer su rupice često preteče pukotina i prijeloma u materijalu. Nastanak ovog oblika korozije usko je vezan za prisutnost agresivnih aniona u elektrolitu i lokalno razaranje pasivnog filma. Najvažnijim uzročnikom smatraju se kloridni ioni (Cl^-), iako rupičastu koroziju mogu potaknuti i drugi halogenidni ioni naročito broma (Br^-) i joda (I^-).



Slika 4.5. Rupičasta korozija. a) detalj, b) tipične morfologije degradacije metala prema ASTM G46-94 [6] (1 - uska i duboka, 2 - eliptična, 3 - široka i plitka, 4 – ispod površinska, 5 - podrivna, 6 - horizontalna, 7 - vertikalna)

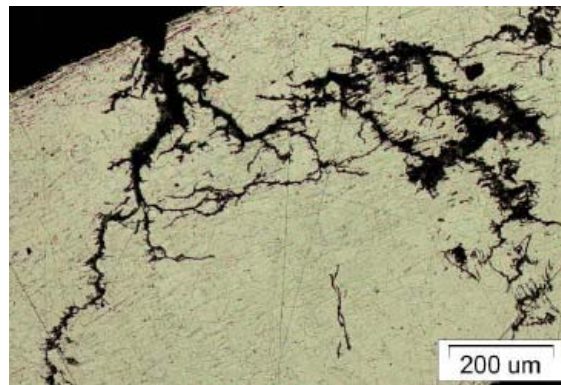
Rangiranje otpornosti nehrđajućih čelika na rupičastu koroziju najčešće se izvodi na osnovi vrijednosti $PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N$ (engl. *Pitting Resistance Equivalent*). Općenito, što je veća vrijednost PRE, to je čelik otporniji na rupičastu koroziju. Čelici s PRE vrijednostima iznad 32 smatraju se otpornima na rupičastu koroziju u morskoj vodi. Tablica 4.3 pokazuje da je moguće odabrati nehrđajuće čelike iz različitih skupina sa sličnom otpornošću. Primjerice, čelici X2CrMoTi18-2 (feritni), X5CrNiMo17-2-2 (austenitni) i X2CrNiN23-4 (dupleks) imaju sličnu otpornost na rupičastu koroziju u kloridnim sredinama.

Tablica 4.3. PRE vrijednosti nekih nehrđajućih čelika

| EN oznaka čelika (EN broj) | PRE (tipično) | EN oznaka čelika (EN broj) | PRE (tipično) |
|----------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| <i>Martenzitni</i> | | <i>Dupleks</i> | |
| X15Cr13 (1.4024) | 11,5 | X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) | 35 |
| X20Cr13 (1.4021) | 12 | X2CrNiN23-4 (1.4362) | 26 |
| <i>Feritni</i> | | <i>Precipitacijski očvrnuti</i> | |
| X6Cr17 (1.4016) | 18 | X4CrNiCuNb16-4 (1.4540) | 15 |
| X2CrMoTi18-2 (1.4521) | 24 | X7CrNiAl17-7 (1.4568) | 17 |
| <i>Austenitni</i> | | | |
| X12CrMnNiN17-7-5 (1.4372) | 20 | | |
| X5CrNi18-10 (1.4301) | 19 | | |
| X5CrNiMo17-2-2 (1.4401) | 24 | | |

Napetosna korozija (engl. *stress corrosion cracking*) je korozijski mehanizam u kojem kombinacija osjetljivog materijala, prisutnih vlačnih naprezanja koja su češće unutarnja

(zaostala), nego vanjska (narinuta) i značajke agresivnog medija dovode do pojave pukotina u materijalu. Pukotine napreduju okomito na smjer naprezanja, a šire se najčešće transkristalno (slika 4.6) ili interkristalno. Posljedica je krhki lom materijala koji su inače žilavi u okolišu koji uzrokuje minimalne opće korozijske pojave. Napetosna korozija je problematična za predviđanje jer prije pojave pukotina, a ponekad i samog loma, na materijalu nema nikakvih lako uočljivih naznaka po kojima bi se moglo naslutiti njezino iniciranje. Stoga su havarije konstrukcija neočekivane i nerijetko uzrokuju visoke troškove.



Slika 4.6. Transkristalno širenje pukotina u austenitnom nehrđajućem čeliku X5CrNi18-10/EN 1.4301 (mikrografija: [2])

Napetosna korozija nehrđajućih čelika se najčešće javlja u elektrolitima koji sadrže kloride (čak i kod vrlo niskih koncentracija Cl^-), hidroksidne ione (OH^-) ili sumporovodik (H_2S). Može se inicirati zasebno, ali kao klice za njezin razvoj mogu poslužiti i žarišta rupičaste korozije. Također, važnu ulogu ima i temperatura. Ispod $55\text{ }^\circ\text{C}$ ovaj se oblik korozije ne pojavljuje.

4.3. Utjecaj hrapavosti obrađene površine na korozijsku otpornost

Korozijski otporniji je onaj materijal kod kojeg, u jednakim vanjskim uvjetima, dolazi do manje intenzivnog razaranja na površini ili do neželjenih promjena mikrostrukture. U kombinaciji s visokom koncentracijom kloridnih iona, hrapavost površine proizašla iz procesa obrade nehrđajućeg čelika ima značajan utjecaj na njegovu korozijsku otpornost. Općenito, površine s nižom hrapavošću imaju nižu brzinu opće korozije i manju osjetljivost na rupičastu koroziju. Sharland [74] je sugerirao da je korozijska otpornost usko povezana s raspodjelom udolina na površini. Značajan utjecaj udolina na korozijsku otpornost povezan je

s njihovom dubinom što utječe na difuziju aktivnih iona tijekom korozije [52]. Grublje površine imaju teksturu s dubljim udolinama u kojima se kloridni ioni mogu akumulirati i razoriti pasivni film, čime se inicira napad korozije. Suprotno, glatke površine imaju manje mjesta gdje se mogu akumulirati kloridni ioni.

Analiza uloge hrapavosti obrađene površine u koroziji nehrđajućih čelika je zanimljiva jer je to parametar koji se može pratiti još u procesu obrade rezanjem. Na hrapavost utječe veliki broj faktora obrade, a najznačajniji su: *parametri rezanja*, *geometrija alata* (osobito polumjer zaobljenja vrha alata) i *trošenje alata* na stražnjoj površini. Kod nižih brzina rezanja postoji rizik od pojavljivanja naljepka i njegovog utjecaja na hrapavost obrađene površine. Porastom brzine rezanja ovaj fenomen nestaje i hrapavost se smanjuje. Međutim, neograničeno povećavanje brzine rezanja ne utječe na daljnje smanjivanje hrapavosti jer se istovremeno povećava temperatura rezanja na čijoj kritičnoj veličini dolazi do omekšavanja materijala obratka i odvijanja mikro deformacije na površini što ponovo pogoršava hrapavost [23]. S povećavanjem posmaka povećava se hrapavost dok veći polumjer zaobljenja vrha alata smanjuje hrapavost. Općenito je pravilo izbor posmaka koji nije veći od trećine polumjera zaobljenja vrha alata [71]. Budući da ne utječe na visinu i oblik neravnina, dubina rezanja obično nije značajna sve dok nije dovoljno velika da uzrokuje podrhtavanje (samouzbudne vibracije) koje jako povećava hrapavost. Kako se povećava trošenje alata koje također zavisi od parametara rezanja, raste i hrapavost. Zato se u zahvatima završne obrade, kada je potrebno ostvariti bolju hrapavost obrađene površine, usvajaju niže vrijednosti kriterija istrošenosti alata.

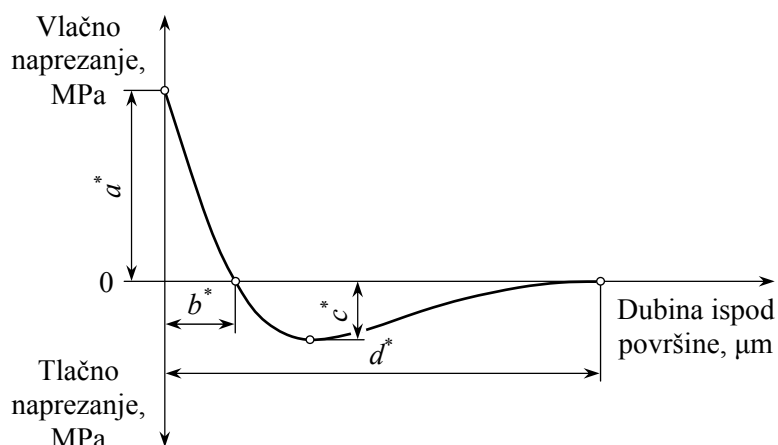
Na temelju iznesenog može se zaključiti sljedeće: *minimalna hrapavost obrađene površine nehrđajućeg čelika osigurava maksimalnu korozijsku otpornost i, posljedično, parametri rezanja i polumjer zaobljenja vrha alata kontroliraju korozijsku otpornost obrađenog dijela.*

4.4. Utjecaj zaostalih naprezanja na korozijsku otpornost

Kvaliteta obrađene površine značajno utječe na njezinu korozijsku otpornost. Očigledan način procjene kvalitete obrađene površine je hrapavost. Zaostala naprezanja nisu vidljiva kao hrapavost obrađene površine, ali mogu imati odlučujući utjecaj na eksploatacijska svojstva obrađenog dijela.

Turnbul i sur. [80] su istraživali glodanje i brušenje austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 304 i utvrdili da je zbog viših zaostalih napreznja rupičasta korozija bila značajnija na brušenoj površini unatoč znatno nižoj hrapavosti u usporedbi s glodanim uzorcima. Braham i sur. [15] su korelirali otpornost tokarene odnosno brušene površine austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 316L na napetosnu koroziju sa zaostalim napreznjima. Korozijska otpornost se povećava kako se zaostale napreznja unesena tijekom obrade smanjuju. Za isti materijal Takakuwa i Soyama [78] navode da uvođenje tlačnog zaostalog napreznja olakšava stvaranje pasivnog filma bez obzira na stanje površine koja varira završnom obradom jer se pasivni film može proizvesti i održavati na niskoj gustoći struje. Stoga, tlačna zaostala napreznja poboljšavaju ne samo mehanička svojstva, nego i korozijsku otpornost.

Rezultati istraživanja su pokazali da zaostala napreznja ne zavise samo od materijala obratka, nego i od postupka obrade rezanjem [34]. Na slici 4.7 prikazana je karakteristična raspodjela obodnih zaostalih napreznja nakon tokarenja nehrđajućih čelika. Na obrađenoj površini je prisutno vlačno zaostalo napreznje koje se brzo smanjuje i mijenja u tlačno unutar vrlo male dubine površinskog sloja. Veličina i oblik profila zaostalih napreznja u površinskom sloju najviše zavise od *parametara rezanja, geometrije alata* i primjene *SHIP-a*. Općenito, porast brzine rezanja povećava vlačno zaostalo napreznje jer proces rezanja postaje više adijabatski [41]. Povećanje posmaka kod nižih brzina rezanja smanjuje dok kod viših brzina rezanja povećava zaostala napreznja [12]. Još jedna posljedica povećanja posmaka je veća dubina rasprostiranja zaostalih napreznja [58]. Povećanje prednjeg kuta alata uzrokuje smanjenje vlačnog dok negativni prednji kut alata dovodi do većeg tlačnog zaostalog napreznja [61]. Veći polumjer zaobljenja glavne oštrice alata izaziva veća zaostala napreznja i gura maksimum tlačnog zaostalog napreznja dublje u obradak [59]. Mali polumjer zaobljenja vrha alata je jedan od strateških parametara za smanjenje zaostalih napreznja i njima zahvaćene dubine [69]. Međutim, ovdje treba biti oprezan jer mali polumjer zaobljenja vrha alata pogoršava hrapavost obrađene površine. Zanimljive rezultate su dobili Leppert i Peng [53] istraživanjem mokre (emulzija) i suhe obrade. Oni su otkrili da za mali posmak koji se inače preporučuje za završnu obradu te nisku i srednju brzinu rezanja, prijelaz s mokre na suhu obradu omogućava smanjenje vlačnog zaostalog napreznja. To znači da se uz pravilno odabrane parametre rezanja i geometriju alata može izbjeći primjena SHIP-a.



Slika 4.7. Parametri profila obodnih zaostalih naprezanja nakon tokarenja nehrđajućih čelika. a^* najveće vlačno naprezanje, b^* dubina vlačnog naprezanja, c^* najveće tlačno naprezanje, d^* dubina zaostalih naprezanja

Na temelju iznesenog može se izvesti sljedeći zaključak: *posebnu pažnju treba posvetiti završnoj obradi nehrđajućeg čelika kako bi se dobilo, ako ne tlačno, tada barem najniže vlačno zaostalo naprezanje na obrađenoj površini i, posljedično, maksimalna korozijska otpornost obrađenog dijela.*

4.5. Obradivost nehrđajućih čelika

Obradivost materijala rezanjem (skidanjem strugotine) nije univerzalno definirano standardizirano svojstvo. To je kompleksni pojam, ne može se jednostavno mjeriti, ne može se karakterizirati nekim brojem koji bi to svojstvo materijala jasno označavao. **Obradivost** se može neodređeno definirati kao "*lakoća*" obrađivanja promatranog materijala obratka. Lakša (bolja) ili teža (lošija) obradivost materijala izravno utječe na kvalitetu obrađene površine i troškove obrade.

Obradivost materijala je usko povezana s njegovim *fizikalnim* i *mehaničkim svojstvima*, *kemijskim sastavom* i *strukturom*. Jedan te isti materijal različito toplinski obrađen ima različitu strukturu i različita mu je obradivost. Utjecaji glavnih svojstava materijala s obzirom na obradivost opisani su u tablici 4.4.

Tablica 4.4. Glavni utjecaji na obradivost [71]

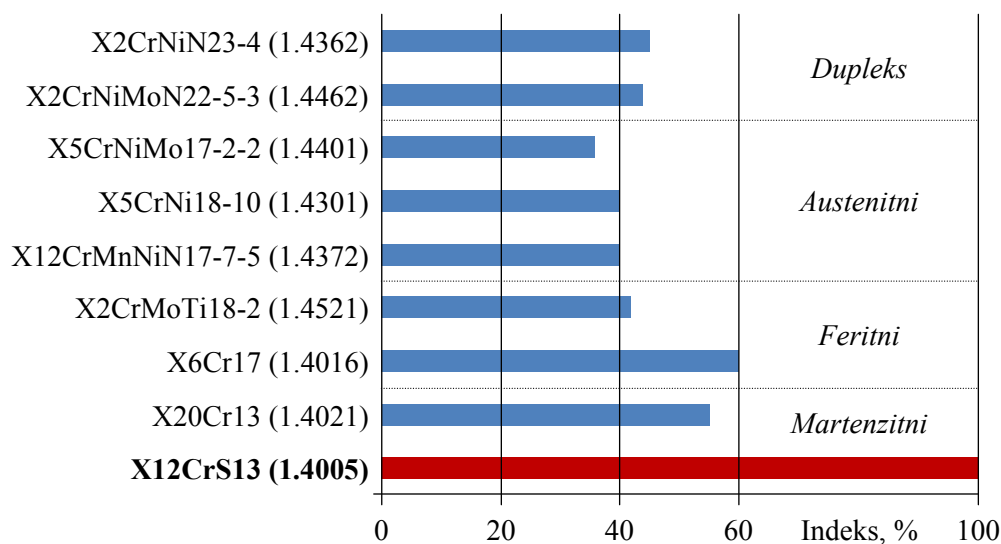
| Svojstva materijala | Utjecaj viših vrijednosti | Svojstva materijala | Utjecaj viših vrijednosti |
|----------------------------|---------------------------|---|---------------------------|
| Tvrdoća i čvrstoća | Negativan | Sadržaj | |
| Duktilnost | Negativan | - makro uključaka | Negativan |
| Toplinska vodljivost | Pozitivan | - mikro uključaka | Negativan / Pozitivan |
| Deformacijsko očvršćivanje | Negativan | Primjese za povećanje obradivosti (S, Pb, Se) | Jako pozitivan |

Nehrđajući čelici pripadaju grupi teško obradivih materijala kod kojih se mogu pojaviti dva glavna problema: kratka postojanost alata i oštećena obrađena površina. Tehnička svojstva karakterističnih nehrđajućih čelika značajna za obradivost uspoređena su u tablici 4.5. Visoka tvrdoća i vlačna čvrstoća martenzitnih nehrđajućih čelika mogu uzrokovati značajno trošenje alata. Osim toga, naklonjeni su deformacijskom očvršćivanju. Feritni nehrđajući čelici uzrokuju umjeren trošenje alata. Međutim, sklone su stvaranju naljepka na alatu, strugotina je trakasta i lamelarna, a obrađena površina ima "kidana" mjesta [64]. Osim što su također sklone stvaranju naljepka na alatu, niska toplinska vodljivost austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika može dovesti do vrlo visokih temperatura u zoni rezanja pa se u slučaju prekomjernog zagrijavanja i spaljivanja površine korozivska otpornost može pogoršati, a komplicira se i hlađenje alata. Također, njihova visoka duktilnost u kombinaciji s tendencijom vrlo brzog deformacijskog očvršćivanja otežava lomljenje strugotine što pogoršava završnu površinu [43]. Povrh toga, kod obrade austenitnih nehrđajućih čelika može se pojaviti martenzitna pretvorba i značajno promijeniti svojstva materijala [1].

Tablica 4.5. Tehnička svojstva karakterističnih nehrđajućih čelika [10]

| EN oznaka čelika (EN broj) | Granica tečenja $R_{p0,2}$, MPa | Vlačna čvrstoća R_m , MPa | Izduženje A_5 , % | Tvrdoća HB | Toplinska vodljivost k , W/(mK) |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------|--------------------------------------|
| <i>Martenzitni</i> | | | | | |
| X20Cr13 (1.4021) | 350 – 450 | 550 – 700 | 16 – 26 | 220 – 260 | 30 |
| <i>Feritni</i> | | | | | |
| X6Cr17 (1.4016) | 300 – 400 | 450 – 550 | 25 – 30 | 150 – 200 | 25 |
| <i>Austenitni</i> | | | | | |
| X5CrNi18-10 (1.4301) | 220 – 270 | 550 – 650 | 45 – 55 | 160 – 210 | 15 |
| <i>Dupleks</i> | | | | | |
| X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) | 460 – 520 | 700 – 800 | 25 – 35 | 200 – 250 | 15 |

Postoje usporedbene ili indeksne metode za određivanje obradivosti kojima se utvrđuje relativna obradivost (*indeks obradivosti*) nekog ispitivanog materijala u odnosu na etalonski materijal pod određenim dogovorenim uvjetima rezanja. Na slici 4.8 uspoređena je relativna obradivost često korištenih nehrđajućih čelika.



Slika 4.8. Indeksi obradivosti nekih nehrđajućih čelika s obzirom na etalonski materijal X12CrS13/EN 1.4005 [56]

Općenito vrijedi da će dobro obradiv (reznjiv) materijal biti onaj koji se može obrađivati visokim brzinama rezanja s prihvatljivim vijekom alata i koji će dati dobru kvalitetu obrađene površine uz niske troškove. Prema tome, osnovne smjernice za obradu nehrđajućih čelika su: *stabilno stegnuti alat i obradak* u svrhu sprečavanja podrhtavanja, *visoka oštrina rezne oštrice* u svrhu smanjivanja deformacijskog očvršćivanja, *veliki pozitivni prednji kut alata* u svrhu prevladavanja stvaranja naljepka, *uporaba alata s lomačem strugotine* gdje je moguće te *obilno zalijevanje zone obrade SHIP-om* s osnovnom svrhom prevladavanja niske toplinske vodljivosti pri čemu nakon obrade treba ukloniti sve tragove SHIP-a kako bi se omogućila samopasivacija obrađene površine [17]. Posljednja smjernica unosi veliko ekološko, zdravstveno i ekonomsko opterećenje u obradu rezanjem i otvara vrata istraživanju mogućnosti uvođenja alternativnog hlađenja vrtložnom cijevi.

5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Eksperimentalno istraživanje obuhvatilo je obradu nehrđajućeg čelika tokarenjem na dva načina: uz hlađenje emulzijom i uz hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom umjesto emulzije. Obavljena su korozijska ispitivanja, analiza elemenata u kemijskim sastavima obrađenih površina i ispitivanja obradivosti.

5.1. Eksperimentalne postavke

5.1.1. Ispitni materijal

Martenzitni nehrđajući čelici se mogu toplinski obraditi *poboljšavanjem* (postupak koji se sastoji od kaljenja i popuštanja pri povišenim temperaturama) i tako postići superiorne razine čvrstoće i tvrdoće u usporedbi s ostalim skupinama nehrđajućih čelika od kojih, međutim, imaju nižu korozijsku otpornost. Ova kombinacija značajki čini martenzitne nehrđajuće čelike logičnim odabirom za predmetno istraživanje.

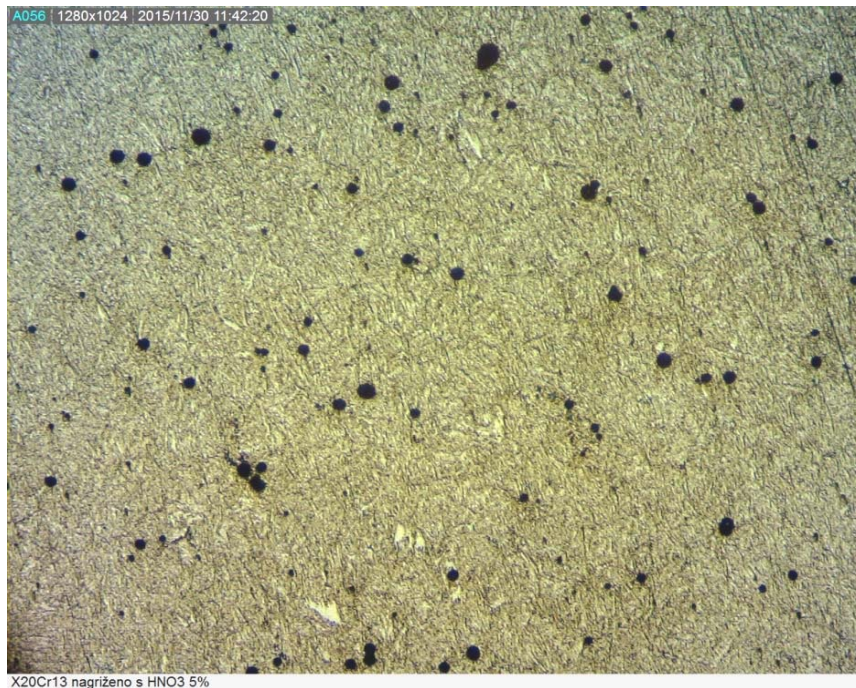
Ispitivao se martenzitni nehrđajući čelik EN oznake X20Cr13 (EN broj 1.4021 odnosno Č4172 prema HRN) u poboljšanom stanju. Kemijski sastav (tablica 5.1) ustanovljen je u Laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu na uređaju ARUN PolySpek. Utvrđena su i mehanička svojstva (tablica 5.2) pri čemu je tvrdoća određena Brinellovom metodom s kuglicom promjera 2,5 mm i silom od 1839 N. Na slici 5.1 je vidljiva martenzitna struktura ispitnog materijala nakon nagrizanja dušičnom kiselinom HNO₃ (5 % u otopini).

Tablica 5.1. Kemijski sastav ispitnog materijala X20Cr13

| Fe, % | C, % | Si, % | Mn, % | P, % | S, % | Cr, % | Mo, % | Ni, % | V, % | Nb, % | Cu, % |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 85,85 | 0,236 | 0,352 | 0,683 | 0,044 | 0,023 | 11,97 | 0,125 | 0,299 | 0,053 | 0,07 | 0,195 |

Tablica 5.2. Mehanička svojstva ispitnog materijala X20Cr13 na sobnoj temperaturi

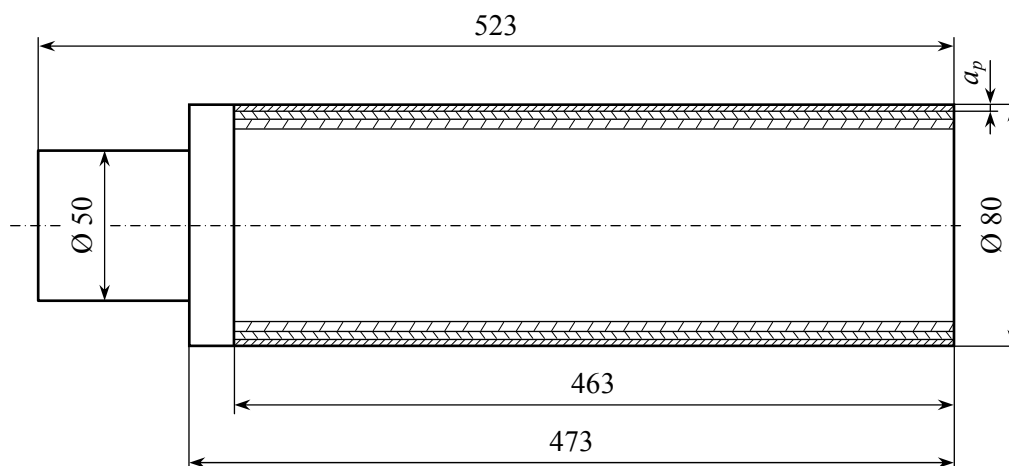
| Granica tečenja $R_{p0,2}$, MPa | Vlačna čvrstoća R_m , MPa | Izduženje A_5 , % | Kontrakcija z , % | Udami rad loma KU , J | Tvrdoća HB |
|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------|
| 750 | 881 | 16,36 | 47 | 15 | 272 |



Slika 5.1. Mikrostruktura ispitnog materijala X20Cr13 pri povećanju 200x (nagriženo s 5 % HNO₃ u otopini)

5.1.2. Obradni sustav

Ekperimenti tokarenja u Laboratoriju za obradu odvajanjem čestica Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci provedeni su na šipkama promjera 80 mm uz dužinu prolaza od 463 mm, slika 5.2. Korištena je CNC tokarilica TU 360 Prvomajska, SECO TP 2501 tvrdometalne rezne pločice ISO oznake DNMG 150608-MF-4 i držač pločica SECO PDNJL 2525M15, slike 5.3 – 5.5. Za svaki je eksperiment korištena nova rezna oštrica.

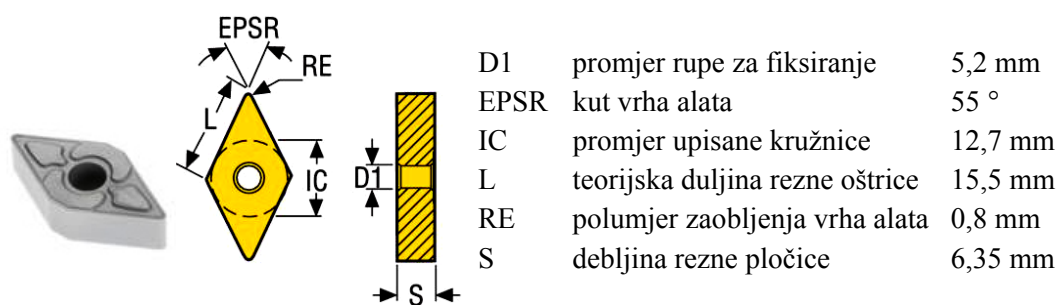


Slika 5.2. Nacrt obratka i prolazi s različitim dubinama rezanja a_p

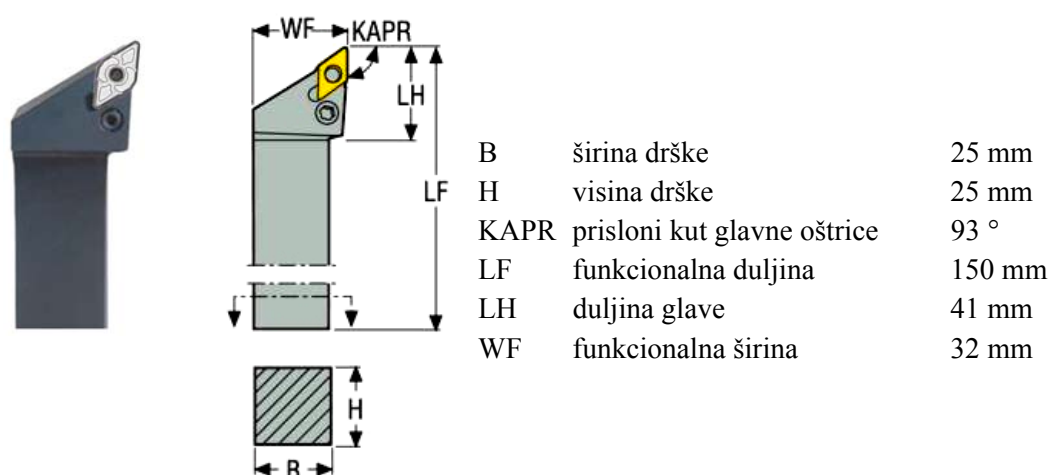
**Tehnički podaci**

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Izdanak glavnog vretena | 6 DIN 55026 |
| Provrt glavnog vretena | 63 mm |
| Promjer stezne glave | 200 mm |
| Najveći moment | 180 Nm |
| Snaga | 30,4 kW |
| Raspon broja okretaja | 50 – 4000 min ⁻¹ |
| Najveći promjer tokarenja | 360 mm |
| Najveći promjer vrtnje | 500 mm |
| Najveća duljina tokarenja | 600 mm |
| Broj upravljanih osi | 2 |
| Brzi hod | 10 m/min |
| Broj alata | 12 |
| Prihvata alata DIN 69880 | Ø 40 mm |
| Upravljanje | PHILIPS |
| Masa stroja | 4300 kg |

Slika 5.3. Laboratorijska CNC tokarilica TU 360 Prvomajska



Slika 5.4. SECO rezna pločica DNMG 150608-MF-4 TP 2501 (www.secotools.com)



Slika 5.5. SECO držač pločice PDNJL 2525M15 (www.secotools.com)

Za mokru obradu korištena je 5 %-tna emulzija (koncentrat INA BU 7, slika 5.6) s protokom od 4,8 l/min. Hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom izvedeno je primjenom klipnog kompresora Presing B7000 (slika 5.7) i protusmjerne vrtložne cijevi Nex Flow™ Frigid-X Cooler System c/w 57025AD (slika 5.8) s protokom zraka od 708 l/min, ulaznim tlakom zraka od 0,69 MPa i temperaturom ohlađenog zraka od -10 °C.



Koncentrat

| | |
|------------------------------------|-------------------------|
| Izgled i boja | bistro, smeđe ulje |
| Gustoća pri 15 °C | 0,899 g/cm ³ |
| Kinematička viskoznost pri 40 °C | 63 mm ² /s |
| Stabilnost pri 4, 20 i 50 °C, 24 h | stabilan |

Emulzija – 5 %-tna u tvrdoj vodi

| | |
|----------------------------|-------------------|
| Izgled i boja | mliječna emulzija |
| Stabilnost pri 20 °C, 24 h | stabilna |
| pH vrijednost | 9 |

Slika 5.6. Emulgirajuća tekućina za obradu metala INA BU 7 (www.ina-maziva.hr)



Tehnički podaci

| | |
|-----------------------|------------|
| Snaga | 7,3 kW |
| Volumen posude | 500 l |
| Maksimalni tlak | 1 MPa |
| Protok zraka na usisu | 1210 l/min |

Slika 5.7. Klipni kompresor Presing B7000



Tehnički podaci

| | |
|----------------------|----------------------|
| Ulazni tlak | 0,69 MPa |
| Potrošnja zraka | 708 (425, 850) l/min |
| Razina jakosti zvuka | 71 (70, 72) dB |

Slika 5.8. Protusmjerna vrtložna cijev Nex Flow™ Frigid-X Cooler System c/w 57025AD

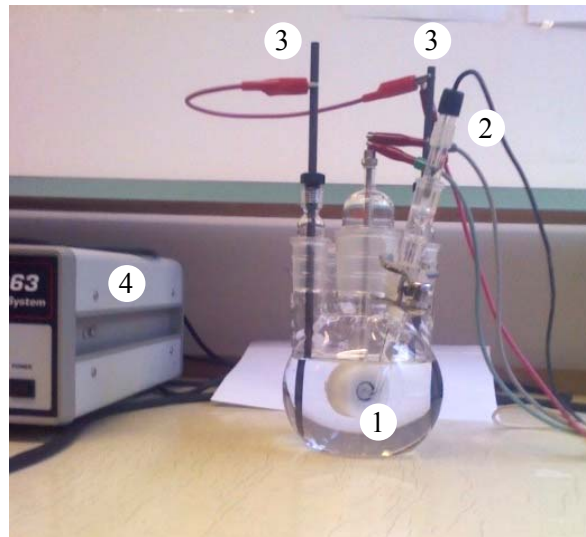
5.1.3. Elektrokemijska mjerenja

Korozijska otpornost materijala se može odrediti različitim metodama. Odziv na niske brzine korozije, kratko eksperimentiranje i dobro utemeljena teorija su glavne prednosti elektrokemijskih mjernih tehnika.

Za elektrokemijska ispitivanja su pripremljena tri uzorka ispitnog materijala X20Cr13: uzorak u osnovnom (neobrađenom) stanju (oznaka OS1), uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom (oznaka EM1) i uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (oznaka VC1). Tokarenje uzoraka EM1 i VC1 je izvedeno sa sljedećim parametrima: brzina rezanja $v_c = 220$ m/min, posmak $f = 0,3$ mm/o i dubina rezanja $a_p = 0,4$ mm.

Elektrokemijska ispitivanja tehnikom s istosmjernom strujom (DC – tehnika; engl. *direct current technique*) su provedena u Kemijskom laboratoriju Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci pomoću potenciostata (elektronički uređaj za kontrolu električnog napona) PARSTAT 2263 opremljenog softverom Electrochemistry PowerSuite. Korištena je elektrokemijska ćelija (slika 5.9) koja se sastojala od 3,5 %-tne vodene otopine natrijevog klorida (NaCl) temperature 25 °C kao elektrolita, radne elektrode iz ispitnog materijala X20Cr13 s uronjenom površinom od 1 cm² (uzorak čiju brzinu korozije treba definirati), zasićene kalomelske elektrode kao referentne elektrode i dvije protuelektrode od grafita. Provedena su dva ispitivanja: *mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga* radi stjecanja uvida o korozijskom ponašanju uzoraka u ispitnom elektrolitu i *potenciodinamička polarizacijska mjerenja* kako bi se odredile njihove trenutne brzine korozije [66].

Ako se strujni krug između radne i protuelektroda pusti otvorenim, razlika potencijala između radne i referentne elektrode se nakon određenog vremena stabilizira oko neke stacionarne vrijednosti koja je jednaka potencijalu otvorenog strujnog kruga E_{ok} pri kojem su anodna struja otapanja metala i katodna struja redukcije istog iznosa, ali suprotnog smjera [42]. Krivulja zavisnosti potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena ($E-t$ dijagram) daje podatak o korozijskom ponašanju/otpornosti uzorka u ispitnom elektrolitu: pozitivna vrijednost potencijala E_{ok} ukazuje na imunost uzorka, negativna vrijednost potencijala E_{ok} ukazuje na otapanje (koroziju), a ako krivulja u $E-t$ dijagramu ima tendenciju rasta dolazi do spontane pasivacije uzorka. Osim toga, uzorak koji ima manju vrijednost potencijala E_{ok} će se brže otopiti u ispitnom elektrolitu.



Slika 5.9. Elektrokemijska ćelija. 1 - radna elektroda (ispitni uzorak), 2 - referentna elektroda, 3 - protuelektrode, 4 - potencijostat

Brzina korozije uzoraka se može odrediti **Tafelovom metodom ekstrapolacije** [77]. Osnovu metode čini Butler-Volmerova jednačba koja je temeljna jednačba elektrokemijske kinetike, a daje vezu između ukupne gustoće struje j koja teče kroz vanjski električni krug i elektrokemijskog (aktivacijskog) prenapona η i glasi:

$$j = j_0 \left[e^{\frac{(1-\alpha)zF}{RT}\eta} - e^{\frac{-\alpha zF}{RT}\eta} \right], \quad (5.1)$$

gdje je j_0 gustoća struje izmjene u $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, α koeficijent prijenosa (vrijednost od 0-1), z broj elektrona uključenih u reakciju elektrode, F Faradayova konstanta ($= 96487 \text{ C mol}^{-1}$), R opća plinska konstanta ($= 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) i T apsolutna temperatura u K. Prenapon η u V je razlika potencijala elektrode kod kojeg teče struja i ravnotežnog potencijala kada elektroda nema polariteta ($= E - E_0$). Dakle, η predstavlja polarizaciju elektrode pa je u slučaju anodnih reakcija je $\eta > 0$ dok je u slučaju katodnih reakcija $\eta < 0$.

Za analizu korozijskog procesa se preuređenjem jednačbe (5.1) dobiva Wagner-Traudova jednačba:

$$j = j_{kor} \left[e^{\frac{(1-\alpha)zF}{RT}(E-E_{kor})} - e^{\frac{-\alpha zF}{RT}(E-E_{kor})} \right], \quad (5.2)$$

gdje je j_{kor} gustoća korozijske struje i E_{kor} korozijski potencijal. Pri visokim apsolutnim vrijednostima prenapona kada je $\eta = |E - E_{kor}| \gg 0$, jedan član u jednadžbi (5.2) postaje zanemariv u odnosu na drugi pa ona prelazi u:

$$j_a = j_{kor} e^{\frac{(1-\alpha)zF}{RT} \eta_a} \text{ za } E \gg E_{kor} \text{ i } j_k = j_{kor} e^{\frac{-\alpha zF}{RT} \eta_k} \text{ za } E \ll E_{kor}, \quad (5.3)$$

gdje su j_a i j_k redosljedno gustoće anodne i katodne struje. Logaritmiranjem dalje slijedi:

$$\eta_a = -\frac{2,303RT}{(1-\alpha)zF} \log j_{kor} + \frac{2,303RT}{(1-\alpha)zF} \log j_a \text{ i } \eta_k = \frac{2,303RT}{\alpha zF} \log j_{kor} - \frac{2,303RT}{\alpha zF} \log j_k. \quad (5.4)$$

Gornji izrazi se općenito zapisuju u obliku Tafelove jednadžbe

$$\eta = a + b \log j, \quad (5.5)$$

pri čemu su odsječci a_a i a_k na ordinati i koeficijenti smjerova (nagibi) b_a i b_k anodnog i katodnog Tafelovog pravca onda određeni izrazima:

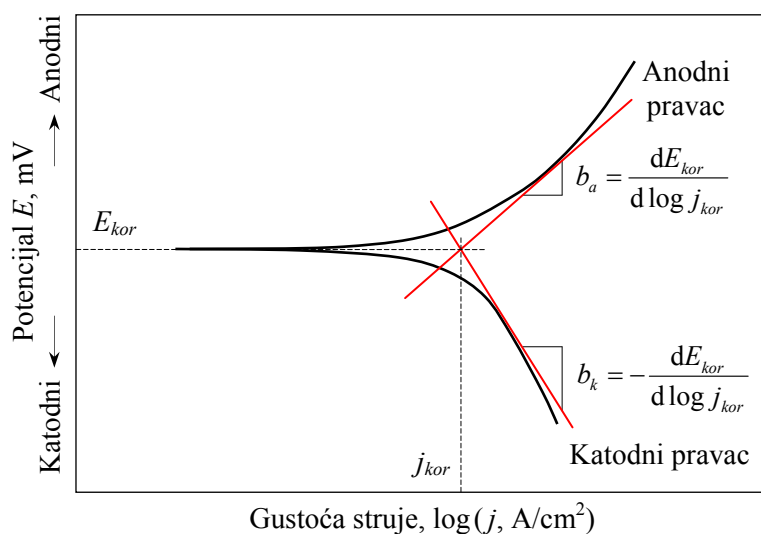
$$a_a = -\frac{2,303RT}{(1-\alpha)zF} \log j_{kor}, \quad a_k = \frac{2,303RT}{\alpha zF} \log j_{kor}, \quad b_a = \frac{2,303RT}{(1-\alpha)zF} \text{ i } b_k = -\frac{2,303RT}{\alpha zF}. \quad (5.6)$$

Rezultati dobiveni anodnom i katodnom polarizacijom u širokom području oko potencijala otvorenog strujnog kruga ($E = E_{ok} \pm 250$ mV) se uobičajeno prikazuju u polulogaritamskom dijagramu E - $\log j$. Sjecište ekstrapoliranih Tafelovih pravaca anodne i katodne polarizacijske krivulje daje izravno gustoću korozijske struje j_{kor} i korozijski potencijal E_{kor} , slika 5.10. Snimanje potenciodinamičkih polarizacijskih krivulja i određivanje vrijednosti j_{kor} i E_{kor} se provodi specijaliziranim mjernim uređajima uz računalnu obradu i prikaz rezultata mjerenja.

Kada se ispravno odredi, j_{kor} odražava trenutnu brzinu korozije v_{korE} u mm/god. prema izrazu navedenom u ASTM normi G102-89 [5]:

$$v_{korE} = 3,27 \cdot 10^{-3} \frac{j_{kor}}{\rho} E_W, \quad (5.7)$$

gdje je j_{kor} u $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, a ρ gustoća u g/cm^3 (ovdje $\rho = 7,74 \text{ g}/\text{cm}^3$) i E_W ekvivalentna masa u g (ovdje $E_W = 26,65 \text{ g}$) ispitnog materijala.



Slika 5.10. Shematski prikaz Tafelove metode ekstrapolacije

5.1.4. Gravimetrijska mjerenja

Gravimetrijska metoda je najraširenija kvantitativna metoda ispitivanja korozije, a provodi se vaganjem uzorka prije izlaganja agresivnoj sredini te nakon izlaganja i uklanjanja čvrstih produkata korozije. Promjena mase, svedena na jedinicu početne geometrijske površine izloženog materijala, prava je mjera za napredovanje korozije. Na temelju dobivenih podataka izračunava se onda prosječna brzina korozije. Kada je pri korozijskim ispitivanjima uzorak zahvaćen samo općom korozijom i kada se tok korozije unutar dugog razdoblja može aproksimirati pravcem, ovom se metodom dobivaju brzine korozije koje su mjerodavne za ocjenu konstrukcijskog materijala.

Gravimetrijskom metodom ne mogu se ispitivati pojave selektivne, interkristalne i napetosne korozije. Točnost ove metode ovisi prije svega o načinu uklanjanja čvrstih produkata korozije (mehaničko, kemijsko ili elektrolitičko čišćenje). Glavni uzroci pogrešaka su nepotpuno uklanjanje čvrstih produkata korozije ili gubitak ispitnog materijala prilikom njihova skidanja. Gravimetrijska metoda je vrlo pouzdana za određivanje brzine korozije, no uvjetovana je duljim vremenom izlaganja uzorka korozivnom mediju, a time i sporim dobivanjem željenih informacija [86].

Za gravimetrijsko ispitivanje korozije su pripremljena tri uzorka ispitnog materijala X20Cr13 identična onima za elektrokemijska ispitivanja, tj.: jedan osnovni (neobrađeni) uzorak (oznaka OS2) i dva tokarena ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm), od kojih prvi uz hlađenje emulzijom (oznaka EM2), a drugi uz hlađenje vrtložnom cijevi (oznaka VC2).

Gravimetrijska ispitivanja su provedena u Kemijskom laboratoriju Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Pripremljeni uzorci su izvagani na laboratorijskoj vagi te je svaki uzorak onda zasebno uronjen u elektrolit (3,5 %-tna vodena otopina NaCl temperature 25 °C) kao što je prikazano na slici 5.11. Uzorci su dalje vagani nakon 14 dana provedenih u elektrolitu radi utvrđivanja gubitka mase.

Uz pretpostavku opće ravnomjerne korozije, *prosječna* brzina korozije v_{korG} u mm/god. se može izračunati prema izrazu navedenom u ASTM normi G1-03 [7]:

$$v_{korG} = 3,65 \cdot 10^3 \frac{\Delta m}{A_s t \rho}, \quad (5.8)$$

gdje je Δm gubitak mase uzorka u g, A_s površina uzorka u cm² (ovdje $A_s = 5,46$ cm²), t broj dana provedenih u elektrolitu i ρ gustoća ispitnog materijala u g/cm³ (ovdje $\rho = 7,74$ g/cm³).



Slika 5.11. Laboratorijska vaga i uzorci (OS2, EM2 i VC2) uronjeni u elektrolit (3,5 %-tna vodena otopina NaCl temperature 25 °C)

5.1.5. SEM/EDS analiza

U svrhu dobivanja uvida u stanje i kemijski sastav površina uzoraka, prije i nakon ispitivanja korozijske otpornosti u 3,5%-tnoj vodenoj otopini NaCl temperature 25 °C, primijenjena je pretražna/skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM; engl. *Scanning Electron Microscopy*) u kombinaciji s energijski razlučujućom/disperzivnom rendgenskom spektroskopijom (EDS; engl. *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*). SEM/EDS analiza površina uzoraka je obavljena u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Korišteni su SEM mikroskop VEGA TS 5136 MM i Oxford Instruments Si(Li) INCA X-sight uređaj za mikrokemijsku analizu, prikazani na slici 5.12.

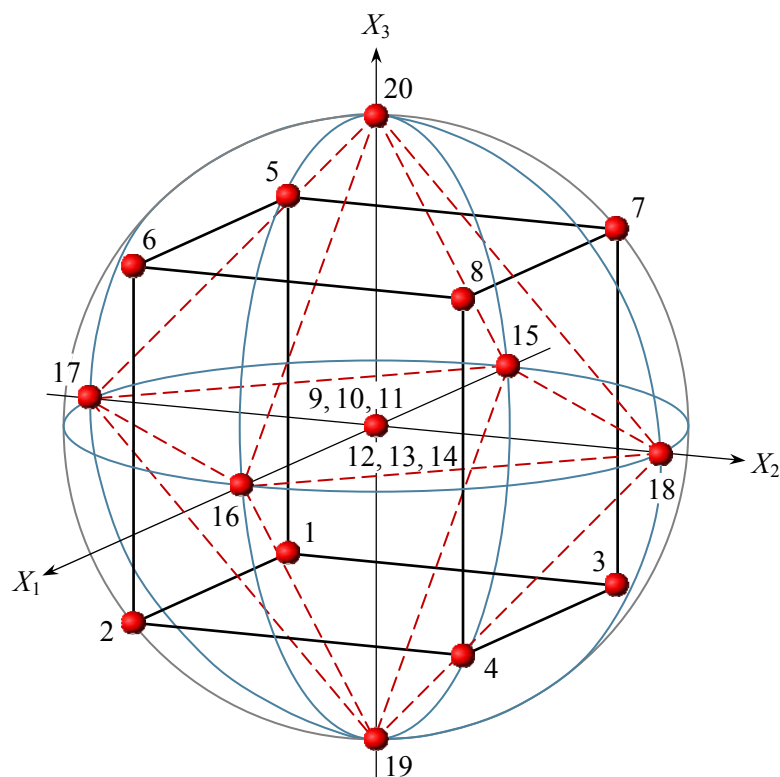


Slika 5.12. Uređaji za SEM/EDS analizu

5.1.6. Ispitivanja obradivosti

Tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 je izvedeno na dva načina: uz konvencionalno hlađenje emulzijom i uz hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom pri čemu se koristila vrtložna cijev protusmjernog protoka. Što je manja hrapavost obrađene površine, bolja je otpornost na koroziju. Ova je činjenica relevantna kod usporedbe utjecaja različitih metoda hlađenja na korozijsku otpornost obrađene površine ispitnog materijala. Također, u analizi utjecaja hlađenja vrtložnom cijevi na troškove proizvodnje, postojanost alata je ključni čimbenik.

Za ispitivanje obradivosti je odabran centralno kompozitni plan pokusa (CCD; engl. *central composite design*) kojeg su Box i Wilson [14] predložili s ciljem smanjivanja broja potrebnih pokusa za opis nelinearnih odziva. Svaki od k faktora se varira na pet razina pri čemu se ne koriste sve kombinacije razina. Umjesto toga CCD čine tri dijela: 1.) potpuni faktorski plan pokusa 2^k na dvije razine (+1 i -1), 2.) središte plana u kojem razina svakog faktora ima srednju vrijednost (0, 0, ..., 0) i 3.) $2k$ osnih točaka pozicioniranih na k osi i jednako razmaknutih na udaljenosti α od središta. Ukupni broj pokusa iznosi $N = 2^k + n_0 + 2k$, gdje je n_0 broj ponavljanja u središtu plana. Izbor vrijednosti n_0 i α određuje karakteristiku plana, odnosno njegovu ortogonalnost i okretljivost [81]. Za okretljivi plan koji omogućuje dobivanje maksimalne nepristrane informacije (raspodjela procijenjene varijance je ujednačena u svim točkama jednako udaljenim od središta) i za $k = 3$ faktora vrijedi $n_0 = 6$ i $\alpha = (2^k)^{0,25} = 1,682$. Na slici 5.13 je grafički prikazan takav plan, a u tablici 5.3 je dana njegova matrica. Zbog preglednosti su pokusi u matrici prikazani standardnim redom. Međutim, za nasumičnu distribuciju nepoznate sustavne pogreške prisutne unutar nepoznatih nekontroliranih faktora se redoslijed izvođenja bira na slučajni način (npr. pomoću generatora slučajnih brojeva).



Slika 5.13. Okretljivi CCD za tri faktora

Tablica 5.3. Matrica okretljivog CCD s tri faktora za opis nelinearnih odziva

| Pokus | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | X_1X_2 | X_1X_3 | X_2X_3 | $X_1X_2X_3$ |
|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|-------------|
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 2 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 7 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | -1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 1 | 1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 1 | 0 | -1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 1 | 0 | 1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 1 | 0 | 0 | -1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Veličine parametara rezanja $x_{i\min}$ i $x_{i\max}$ u tablici 5.4 su odabrane prema preporuci proizvođača alata dok su ostale veličine određene prema sljedećim izrazima:

$$x_{i0} = \frac{1}{2}(x_{i\max} + x_{i\min}), \quad (5.9)$$

$$\Delta x_i = \frac{1}{2}(x_{i\max} - x_{i\min}), \quad (5.10)$$

$$x_{i\alpha} = x_{i0} \pm \alpha \Delta x_i \Rightarrow X_{i\alpha} = \pm \alpha, \quad (5.11)$$

$$X_i = \frac{x_i - x_{i\max}}{\Delta x_i} \Rightarrow x_{i\min} \rightarrow X_i = -1, x_{i0} \rightarrow X_i = 0, x_{i\max} \rightarrow X_i = 1. \quad (5.12)$$

Tablica 5.4. Vrijednosti parametara rezanja i njihovi kodovi

| Parametri | $-x_{ia}$ | $x_{i\min}$ | x_{i0} | $x_{i\max}$ | x_{ia} |
|------------------------------|-----------|-------------|----------|-------------|----------|
| Brzina rezanja v_c , m/min | 136 | 170 | 220 | 270 | 304 |
| Posmak f , mm/o | 0,13 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,47 |
| Dubina rezanja a_p , mm | 0,23 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,57 |
| Kodovi | -1,682 | -1 | 0 | 1 | 1,682 |

Mjerenje hrapavosti obrađene površine je izvedeno profilometrom Hommel Tester T1000 proizvođača Jenoptik, Njemačka. Da bi se izbjegle moguće pogreške zbog operacije ponovnog stezanja obratka, parametar hrapavosti Ra (srednje aritmetičko odstupanje profila) je mjereno na obratku izravno u tokarilici, slika 5.14. Također, da bi se smanjilo odstupanje, kao rezultat svakog eksperimenta je uzeta prosječna vrijednost tri mjerenja. Usporedba rezultata površinske hrapavosti za tokarenje uz hlađenje emulzijom odnosno vrtložnom cijevi je izvedena statističkim testovima, F -testom i t -testom. Matematički modeli hrapavosti su određeni višestrukom regresijskom analizom eksperimentalnih rezultata.

Postojanost alata T je procijenjena prema normi ISO 3685:1993(E) [40] za kriterij istrošenosti stražnje površine alata $VB = 0,5$ mm. Za mjerenje trošenja alata je korišten je digitalni

**Slika 5.14.** Eksperimentalna konfiguracija za ispitivanje obradivosti

mikroskop Dino Lite Pro (rezolucija 1280×1024 piksela s povećanjem do 200x) proizvođača AnMo Electronics Corporation, Taiwan, koji sadrži kameru, slika 5.14. Uz mikroskop se koristi i pribor s pozadinskim osvjetljenjem (jakost preko 5000 mcd) i ugrađenim okretljivim polarizatorom, na koji se postavlja rezna pločica čiji se vrh snima kamerom, a istrošenost se mjeri u programskom paketu DinoCapture. Matematički modeli postojanosti alata (proširene Taylorove jednadžbe) su određeni višestrukom regresijskom analizom rezultata pokusa.

Kod tokarenja uz hlađenje emulzijom su rezultati mjerenja bilježeni nakon svake polovice prolaza. Budući da je bilo vjerojatno očekivati povećano trošenje alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi, rezultati mjerenja su bilježeni nakon svake trećine prolaza. Pripremljeni su odgovarajući NC programi za tokarenje, a primjeri su prikazani u tablici 5.5.

Tablica 5.5. NC programi za prvi prolaz obrade ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 5$ mm)

| Tokarenje uz hlađenje emulzijom | Tokarenje uz hlađenje vrtložnom cijevi |
|---------------------------------|--|
| %PM | %PM |
| N9002 | N9003 |
| N10 G53 | N10 G53 T06063 |
| N20 G96 S170 D2000 M4 | N20 G96 S170 D2000 M4 |
| N30 T06063 | N30 G0 X41 Z643 |
| N40 G0 X41 Z643 M8 | N40 G1 X39.5 F0.4 |
| N50 G1 X39.5 F0.4 | N50 G1 Z480 |
| N60 G1 Z380 | N60 G1 X102 F1 |
| N70 G1 X41 F1 | N70 M0 |
| N80 G0 X102 M9 | N80 G0 X41 Z485 M4 |
| N90 M0 | N90 G1 X39.5 F0.4 |
| N100 G0 X41 Z385 M4 | N100 G1 Z325 |
| N110 M8 | N110 G1 X102 F1 |
| N120 G1 X39.5 F0.4 | N120 M0 |
| N130 G1 Z175 | N130 G0 X41 Z330 M4 |
| N140 G1 X41 F1 | N140 G1 X39.5 F0.4 |
| N150 G0 X150 Z600 | N150 G1 Z175 |
| N160 M30 | N160 G1 X102 F1 |
| | N170 G0 X150 Z600 |
| | N180 M30 |

5.2. Rezultati i rasprava

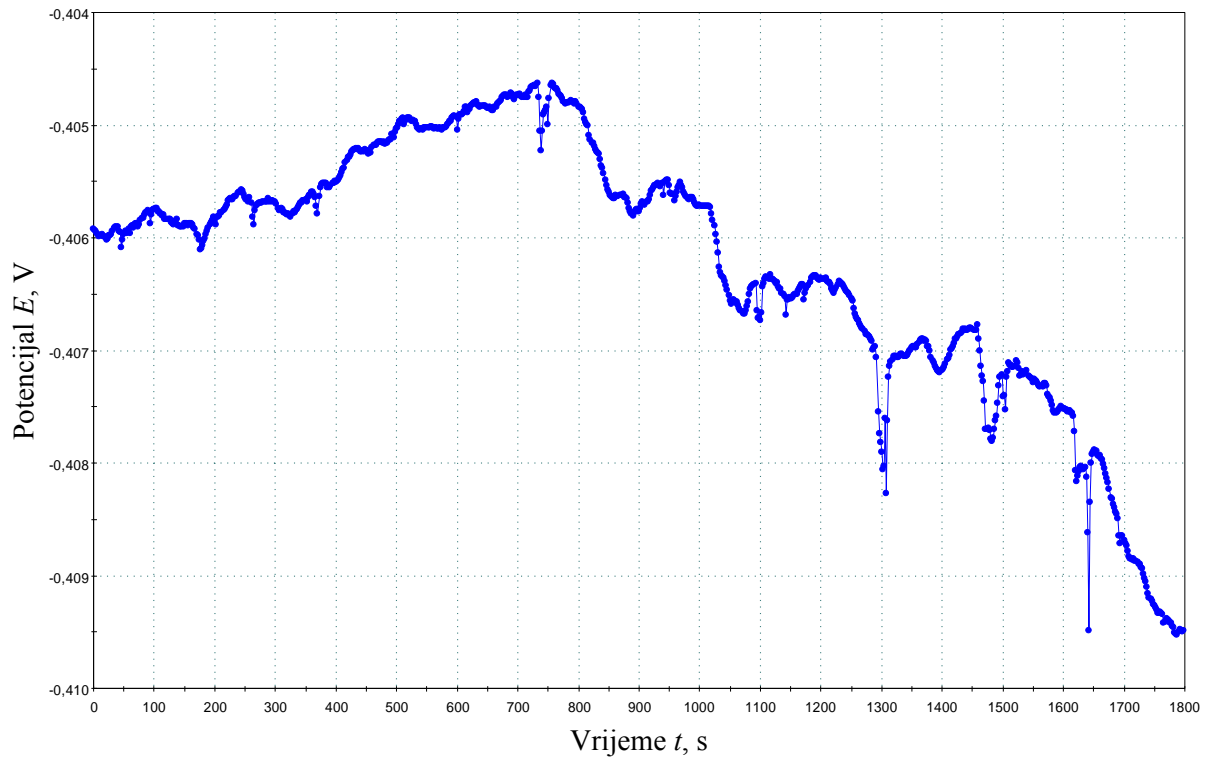
5.2.1. Elektrokemijski rezultati

Na slikama 5.15 – 5.17 su prikazani dijagrami zavisnosti potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za ispitivane uzorke X20Cr13 u 3,5 %-tnoj vodenoj otopini NaCl na 25 °C, a njihovu usporedbu prikazuje zbirni dijagram na slici 5.18. U tablici 5.6 su navedeni potencijali otvorenog strujnog kruga E_{ok} dosegnuti nakon 30 min i izmjerene površinske hrapavosti (parametar Ra) uzoraka prije izlaganja elektrolitu.

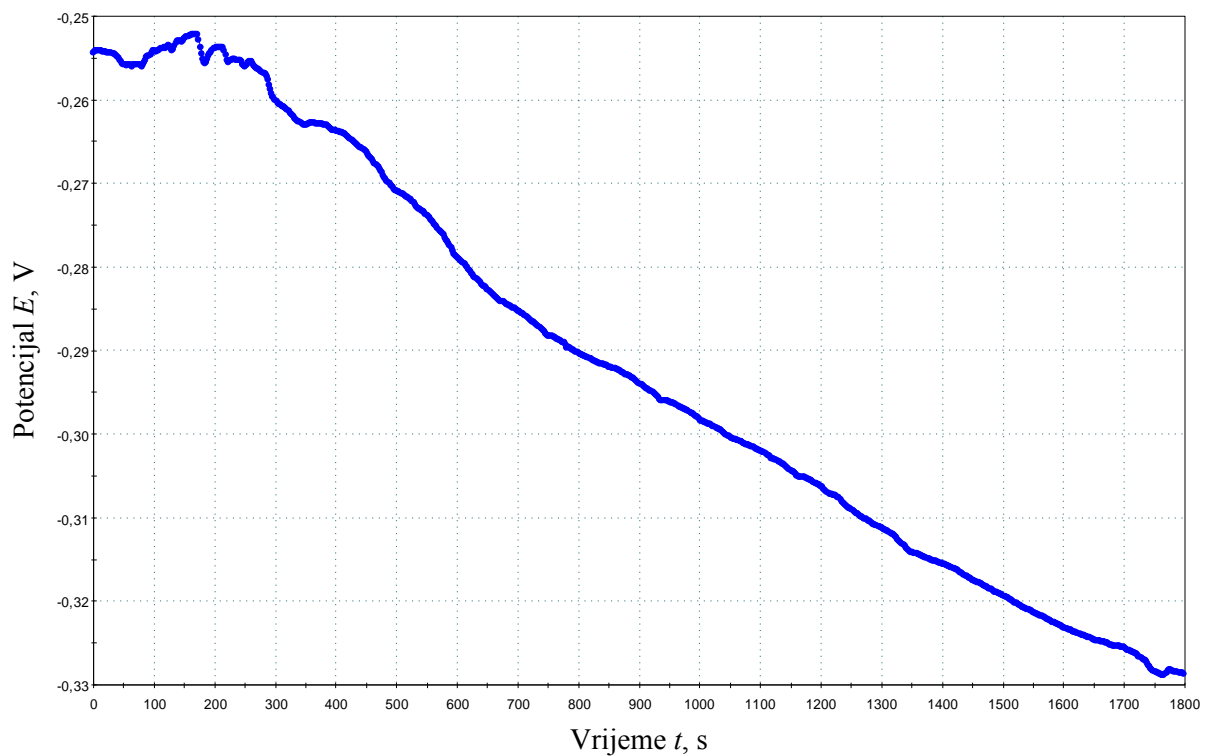
Na temelju krivulja u $E-t$ dijagramu (slika 5.18) se može provesti usporedba između uzoraka. Postoji jasan dokaz o učinku metode hlađenja i hrapavosti obrađene površine kroz varijaciju potencijala kao posljedice strukturnih promjena do kojih dolazi zbog odvijanja elektrodne reakcije na granici faza elektroda/elektrolit.

Za uzorak u osnovnom (neobrađenom) stanju (OS1) je vidljivo da pripadajuća krivulja potencijala kod otvorenog strujnog kruga nema većih odstupanja i blago pada. Međutim, budući da ima najveću površinsku hrapavost, vrijednost potencijala otvorenog strujnog kruga E_{ok} je najnegativnija od sva tri promatrana uzorka što pokazuje njegovu slabiju korozijsku otpornost.

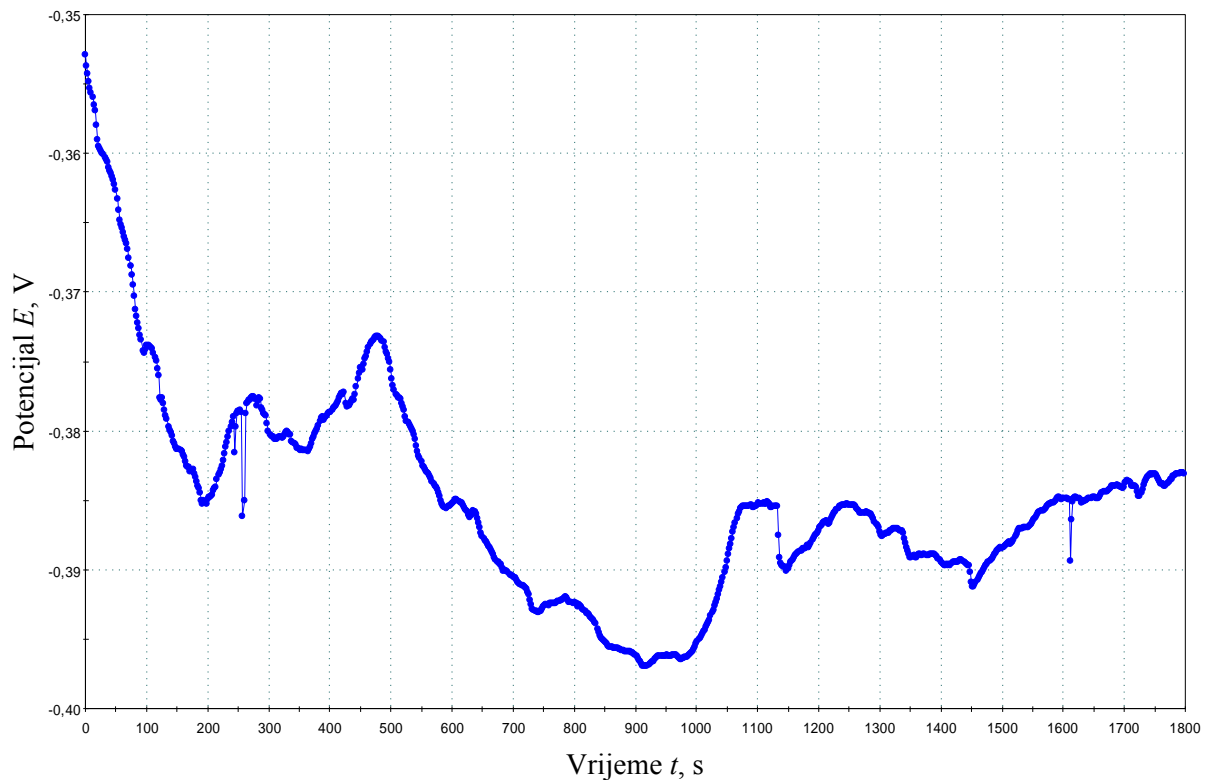
Uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom (EM1) ima najmanju površinsku hrapavost i stoga pokazuje najveću vrijednost potencijala otvorenog strujnog kruga E_{ok} , a time i bolju korozijsku otpornost u odnosu na ostale uzorke. Međutim, nakon kratke početne stabilnosti pripadajuća krivulja potencijala kod otvorenog strujnog kruga ima tendenciju izraženog pada. Uzrok tome je prisutnost zaostalog zaštitnog filma emulzije na početku koji se nakon nekog vremena "razbije" pa korozijska otpornost ovog uzorka vremenom značajno opada.



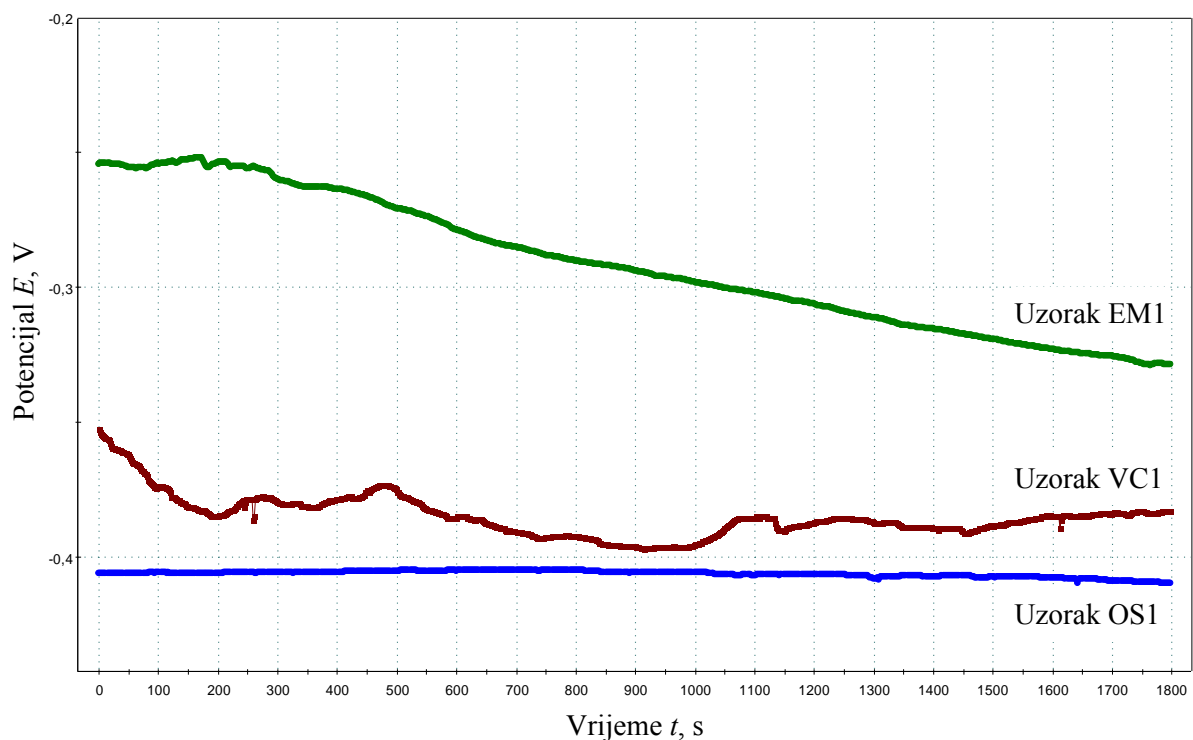
Slika 5.15. Zavisnost potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za osnovni (neobrađeni) uzorak X20Cr13 (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C)



Slika 5.16. Zavisnost potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje emulzijom (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C)



Slika 5.17. Zavisnost potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C)



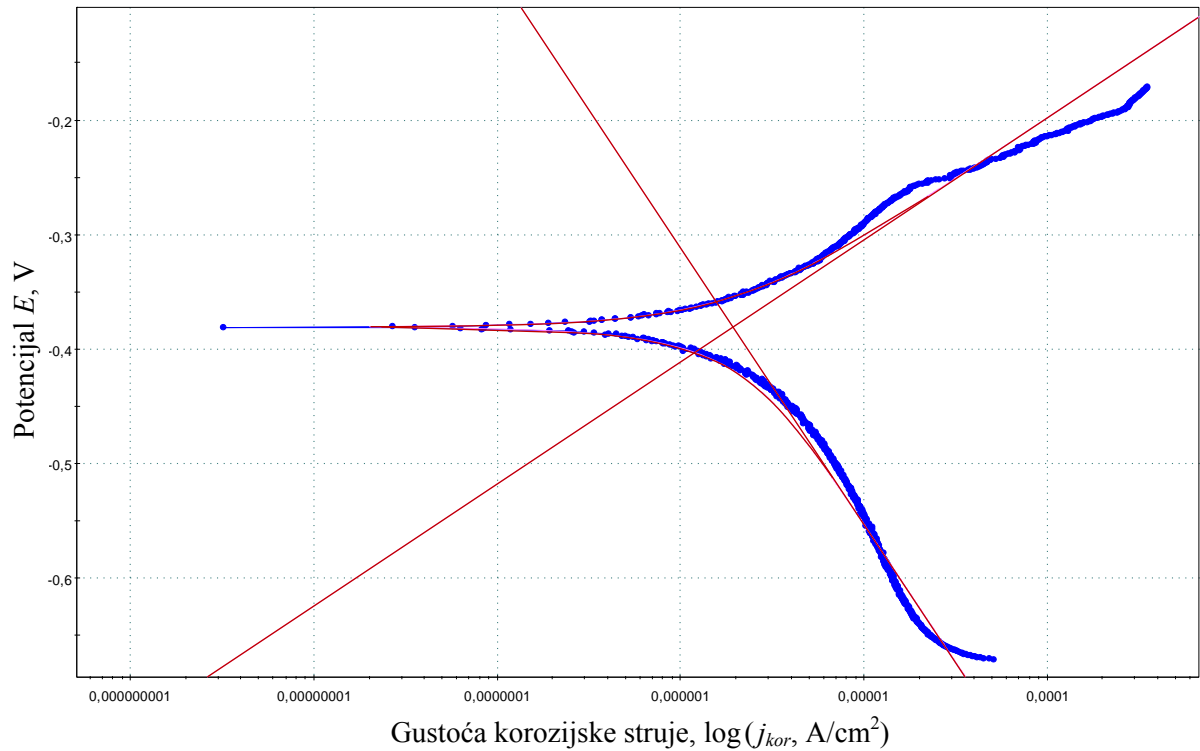
Slika 5.18. Usporedba zavisnosti potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za ispitivane uzorke X20Cr13 u 3,5 %-tnoj vodenoj otopini NaCl na 25 °C. EM1 uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom, VC1 uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi, OS1 osnovni (neobrađeni) uzorak

Tablica 5.6. Potencijali kod otvorenog strujnog kruga

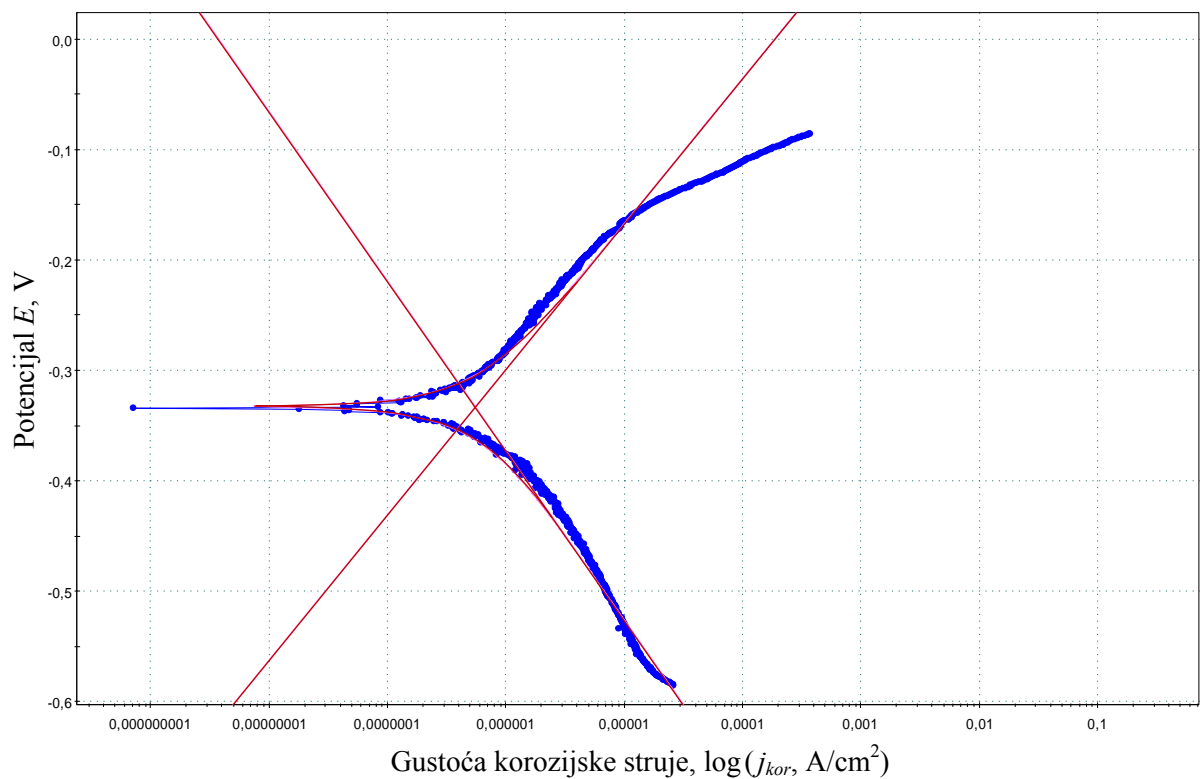
| Uzorak | Hrapavost Ra , μm (prije izlaganja elektrolitu) | Početni potencijal, mV | Potencijal nakon 15 min, mV | Potencijal nakon 30 min (E_{ok}), mV |
|--------|--|------------------------|-----------------------------|--|
| EM1 | 1,533 | -254,3 | -294 | -328,6 |
| VC1 | 1,675 | -352,8 | -396,2 | -383 |
| OS1 | 1,795 | -405,9 | -405,8 | -409,5 |

Uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (VC1) se s obzirom na površinsku hrapavost i korozijsku otpornost pozicionirao između prethodna dva uzorka. Međutim, ovaj je uzorak specifičan po tome što prvo pokazuje blagi pad pripadajuće krivulje potencijala kod otvorenog strujnog kruga, a zatim, nakon nekog vremena, tendenciju njezinog rasta. Prema tome, krivulja ukazuje na fenomen depasivacije-pasivacije. Na površini uzorka se pojavljuje odgođeno spontano stvaranje i postupno debljanje pasivnog oksidnog filma (tj. zaštitnog sloja) pa njegova korozijska otpornost vremenom raste. Drukčije rečeno, uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi se dugoročno bolje odupire korozijskom djelovanju.

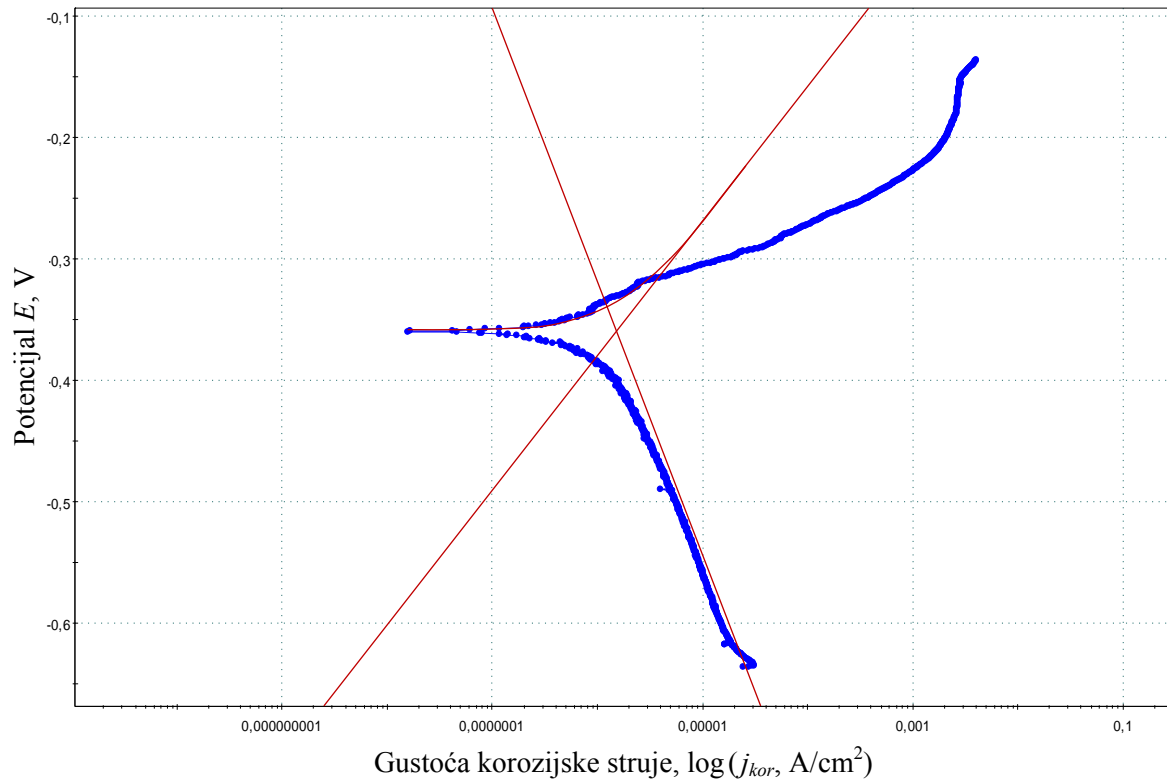
Potenciodinamička polarizacijska mjerenja su se provodila nakon stabiliziranja sustava uzorak-elektrolit na vrijednosti potencijala otvorenog strujnog kruga E_{ok} . Potenciodinamičke polarizacijske krivulje promatranih uzoraka (OS1, EM1 i VC1) dobivene pri brzini pretraživanja od 0,166 mV/s su prikazane u polulogaritamskim dijagramima E -log j na slikama 5.19 – 5.21. Također su prikazani i pripadajući Tafelovi pravci. Usporedbu svih potenciodinamičkih polarizacijskih krivulja prikazuje zbirni dijagram na slici 5.22. Za svaki uzorak su iz pripadajuće krivulje izvučeni glavni parametri korozijskog procesa: koeficijenti smjerova (nagibi) b_a i b_k anodnog i katodnog Tafelovog pravca, gustoća korozijske struje j_{kor} i korozijski potencijal E_{kor} . U tablici 5.7 su navedeni dobiveni podaci i izračunate brzine korozije v_{korE} iz izraza (5.7).



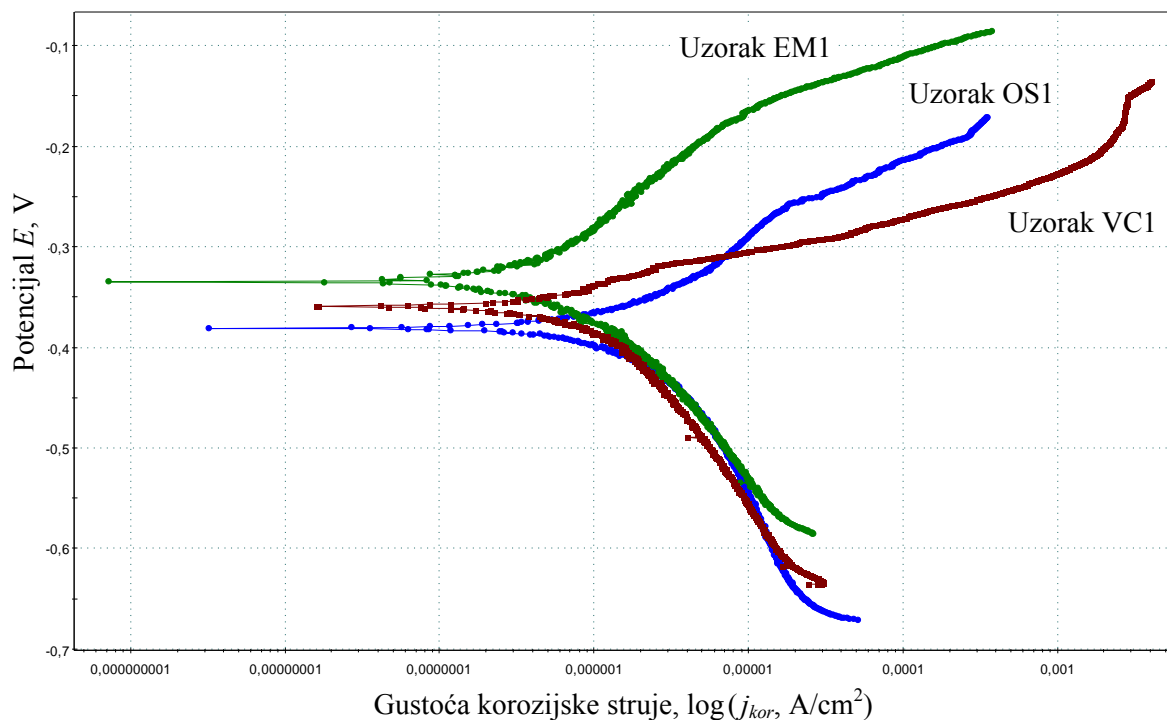
Slika 5.19. Potenciodinamičke polarizacijske krivulje za osnovni (neobrađeni) uzorak X20Cr13 (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)



Slika 5.20. Potenciodinamičke polarizacijske krivulje za uzorak X20Cr13 tokren uz hlađenje emulzijom (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)



Slika 5.21. Potenciodinamičke polarizacijske krivulje za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)



Slika 5.22. Usporedba potenciodinamičkih polarizacijskih krivulja za ispitivane uzorke X20Cr13 (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s). EM1 uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom, VC1 uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi, OS1 osnovni (neobrađeni) uzorak

Tablica 5.7. Tafelovi podaci i elektrokemijske brzine korozije

| Uzorak | b_a , mV/dekada | b_k , mV/dekada | j_{kor} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ | E_{kor} , mV | v_{korE} , mm/god. |
|--------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------|----------------------|
| EM1 | 131,6 | 153,7 | 0,555 | -332,7 | 0,00625 |
| VO1 | 116,9 | 238,2 | 1,533 | -359,7 | 0,01726 |
| OS1 | 106,7 | 241,7 | 1,94 | -380,7 | 0,0218 |

Što se tiče Tafelovih nagiba b_a i b_k treba naglasiti da će uzorak s tendencijom pasivacije imati $b_a > b_k$ dok će uzorak koji korodira imati $b_a < b_k$ [68]. Vrijednosti b_a i b_k u tablici 5.7 otkrivaju da svi uzorci pokazuju tendenciju depasivacije. Uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom (EM1) pokazuje najveću vrijednost potencijala E_{kor} i stoga najnižu predispoziciju za koroziju. Budući da je brzina korozije v_{korE} proporcionalna gustoći korozijske struje j_{kor} , uzorak u osnovnom (neobrađenom) stanju (OS1) pokazuje onda najvišu brzinu korozije. Korozijska svojstva uzorka tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi (VC1) su između prethodna dva uzorka.

5.2.2. Usporedba gravimetrijskih i elektrokemijskih brzina korozije

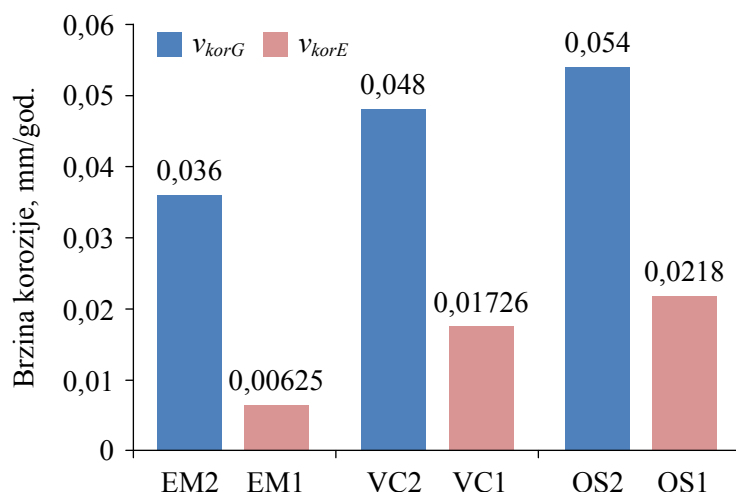
U tablici 5.8 su prikazani rezultati izračuna brzine korozije v_{korG} temeljem gubitka mase ispitivanih uzoraka X20Cr13 nakon 14 dana provedenih u 3,5 %-tnoj vodenoj otopini NaCl na 25 °C. Ponovo se može vidjeti da je uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom (EM2) najotporniji na koroziju u ispitnom elektrolitu, zatim uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (VC2) i na kraju uzorak u osnovnom (neobrađenom) stanju (OS2).

Tablica 5.8. Gravimetrijske brzine korozije (3,5 %-tna vodena otopina NaCl, 25 °C, 14 dana)

| Uzorak | Početna masa, g | Δm , g | v_{korG} , mm/god. |
|--------|-----------------|----------------|----------------------|
| EM2 | 4,5307 | 0,0059 | 0,036 |
| VO2 | 4,4051 | 0,0078 | 0,048 |
| OS2 | 4,5180 | 0,0088 | 0,054 |

Brzina korozije dobivena mjerenjem gubitka mase je prosječna dok je brzina korozije dobivena Tafelovom metodom ekstrapolacije trenutna. Stoga se gravimetrijska brzina korozije može bitno razlikovati od elektrokemijske brzine korozije. Razlika se uobičajeno javlja zbog vremenskih učinaka i neuobičajeno zbog pogrešaka u određivanju gustoće korozijske struje [91].

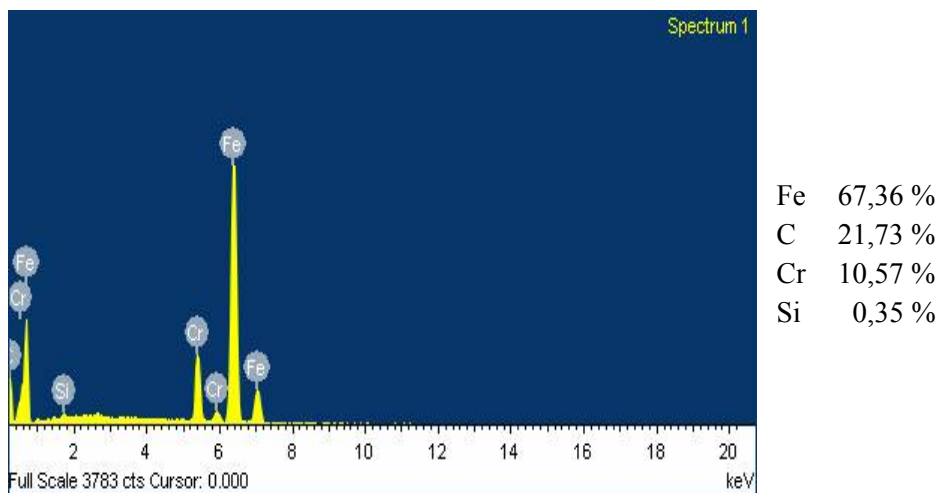
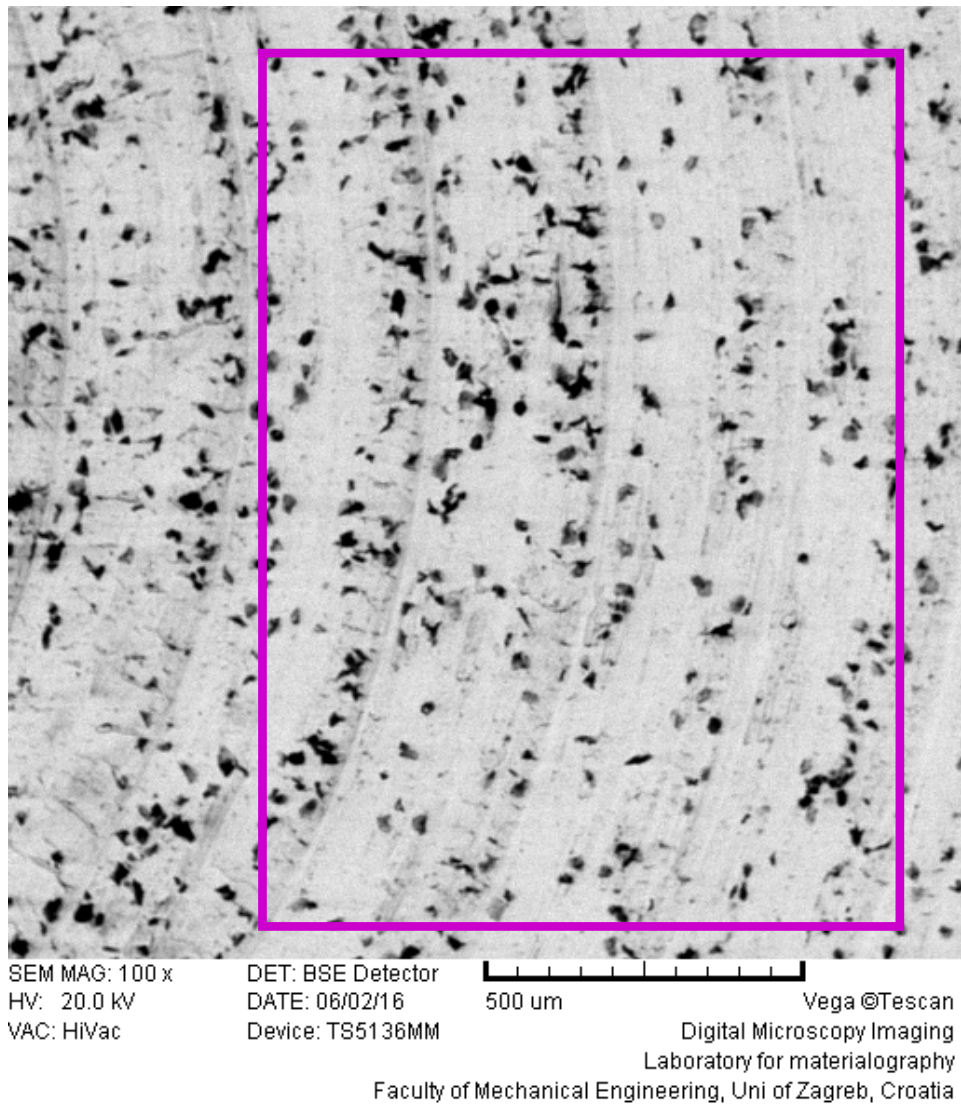
Gravimetrijske i elektrokemijske brzine korozije su uspoređene na slici 5.23. Kao što se može vidjeti, sve izmjerene vrijednosti su bile znatno ispod one dopuštene od 0,1 mm/god. [62]. Gravimetrijska brzina korozije uzorka EM2 je bila 5,76 puta veća od elektrokemijske. Međutim, gravimetrijska brzina korozije uzorka VC2 je bila samo 2,78 puta veća od elektrokemijske. To je u skladu s rezultatima mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga i dovodi do važnog zaključka da hlađenje vrtložnom cijevi pri tokarenju ispitnog materijala X20Cr13 ima dugoročno povoljan učinak na korozijsku otpornost.



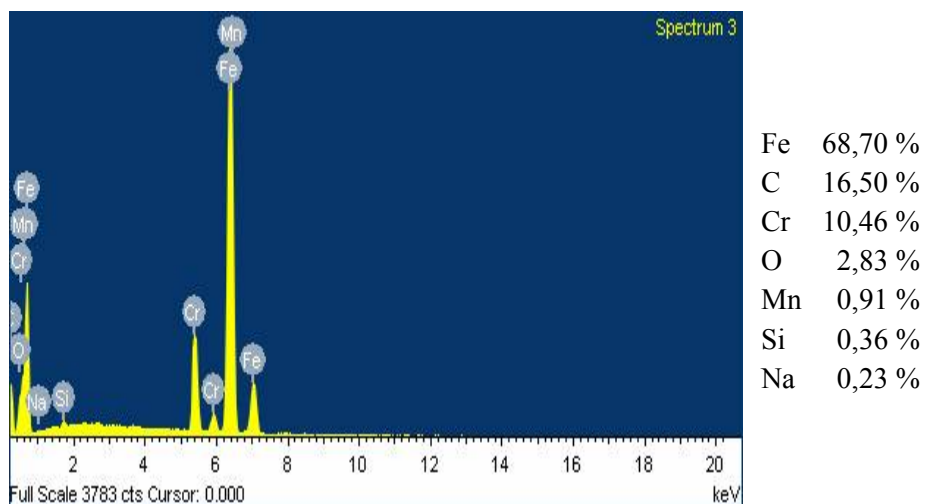
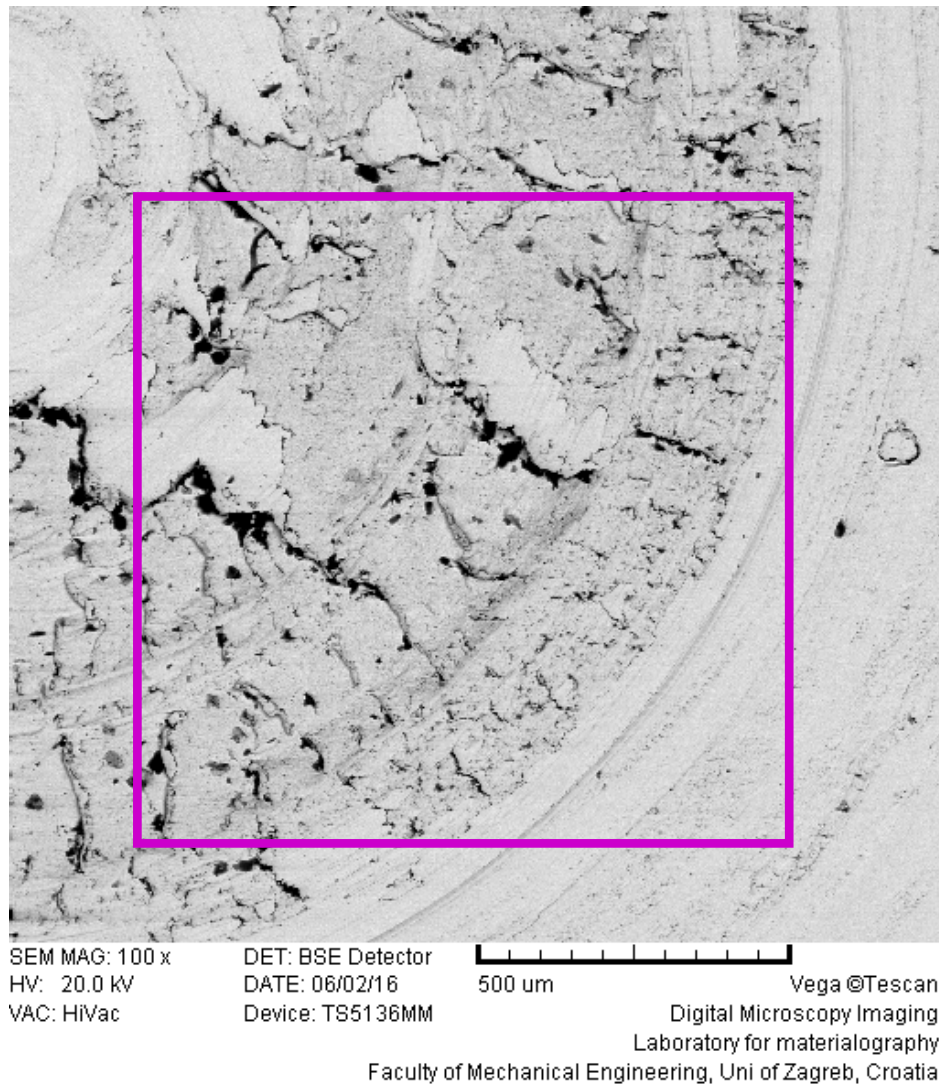
Slika 5.23. Usporedba gravimetrijskih v_{korG} i elektrokemijskih v_{korE} brzina korozije za ispitivane uzorke X20Cr13. EMx uzorak tokaren uz hlađenje emulzijom, VCx uzorak tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi, OSx osnovni (neobrađeni) uzorak

5.2.3. SEM/EDS rezultati

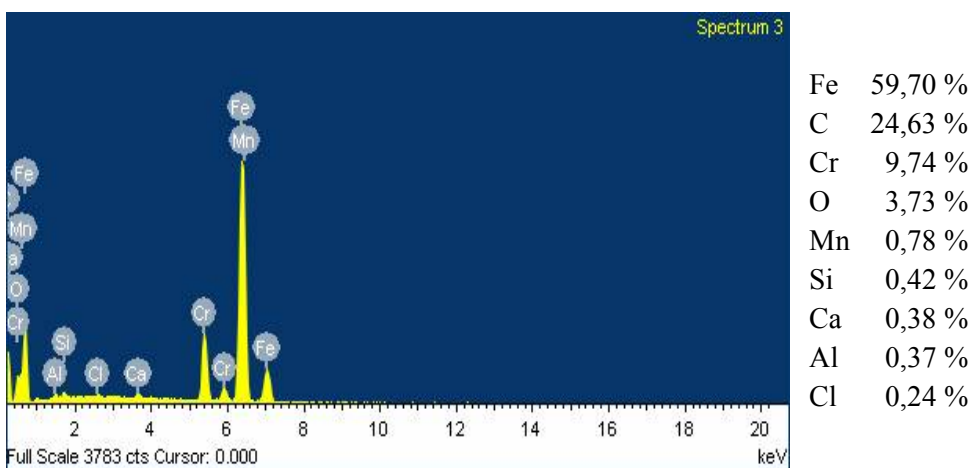
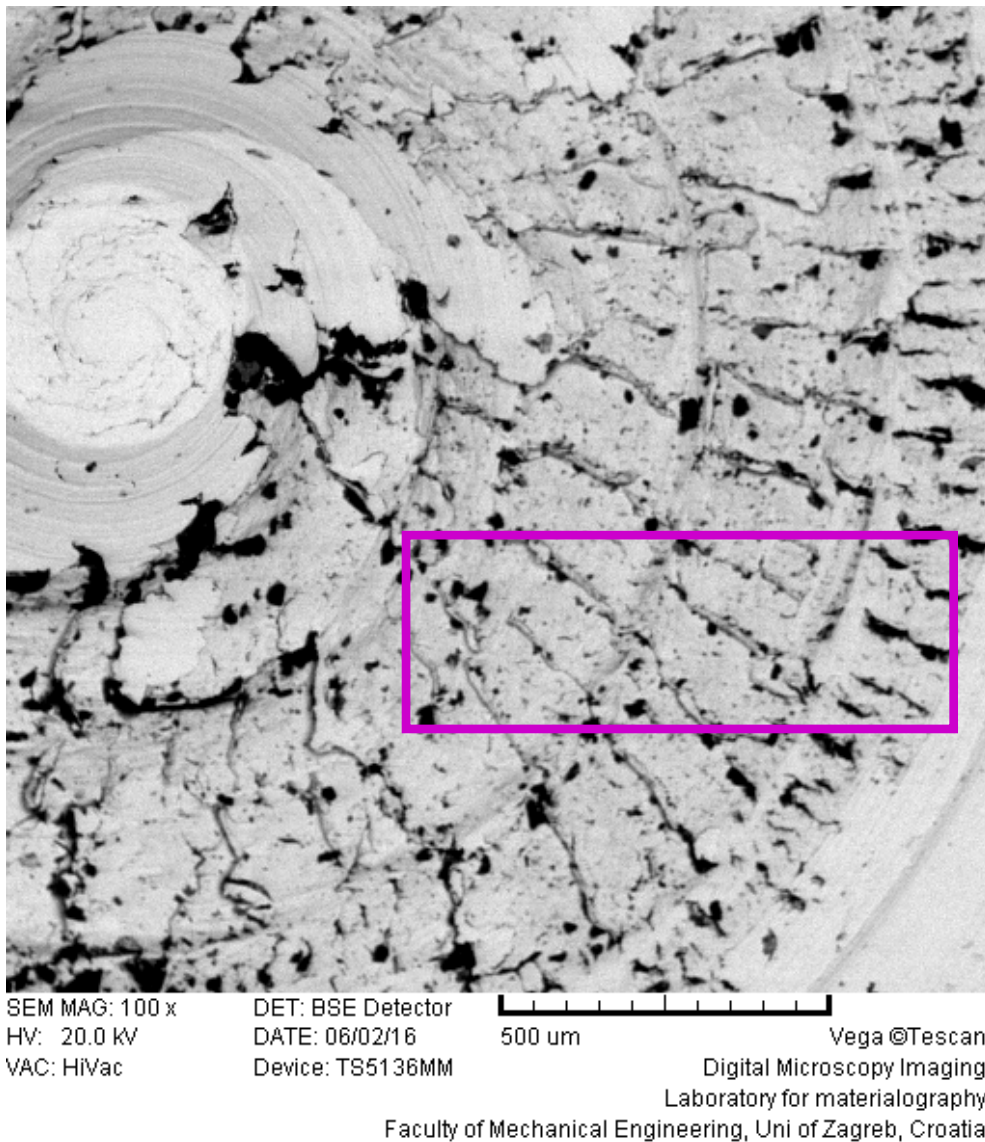
Slike 5.24 – 5.29 prikazuju SEM fotografije (povećanje 100 x) površina uzoraka ispitnog materijala X20Cr13 prije i nakon elektrokemijskog ispitivanja korozije u 3,5 %-tnoj vodenoj otopini NaCl temperature 25 °C tijekom 30 min. Uočljivi su tragovi posmaka, površinska oštećenja i formacije karbida. Kako bi se mogli donijeti relevantni zaključci, na istim su slikama prikazani i rezultati EDS analize kojom su identificirani kemijski elementi i njihov sadržaj unutar promatranih površina na uzorcima. Svi podaci mikrokemijske analize objedinjeni su u tablici 5.9.



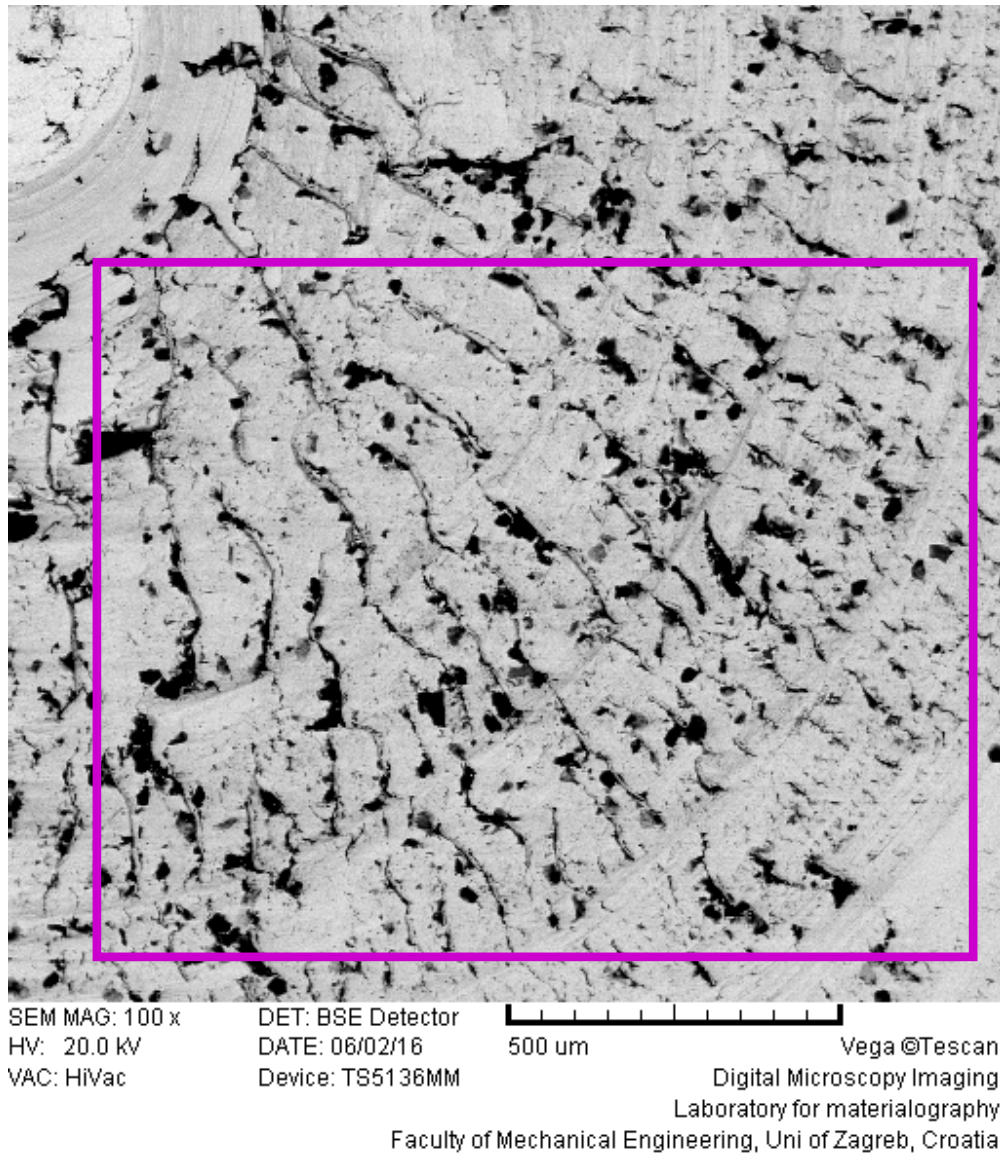
Slika 5.24. SEM/EDS analiza osnovnog (neobrađenog) uzorka X20Cr13



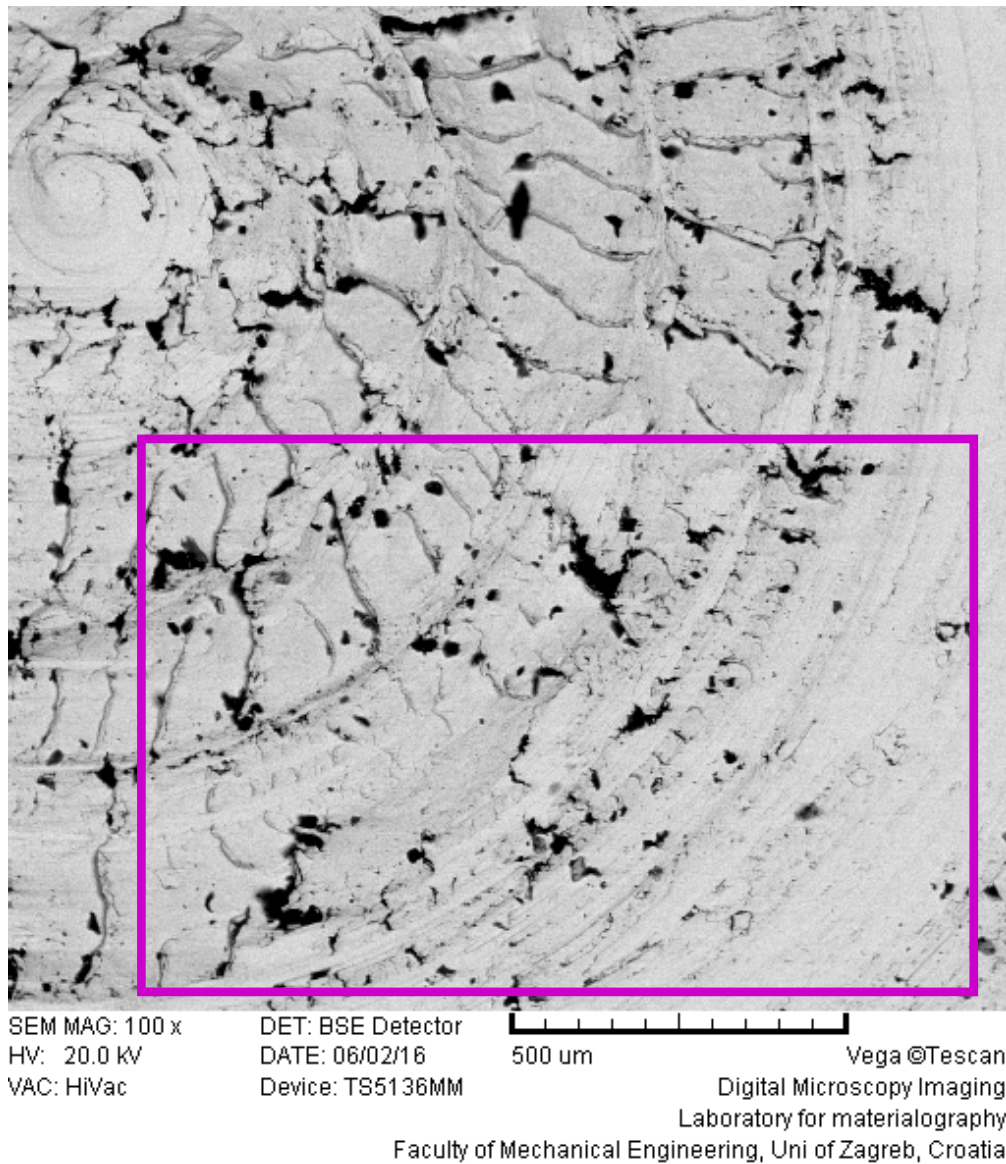
Slika 5.25. SEM/EDS analiza osnovnog (neobrađenog) uzorka X20Cr13 nakon izlaganja elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, 30 min)



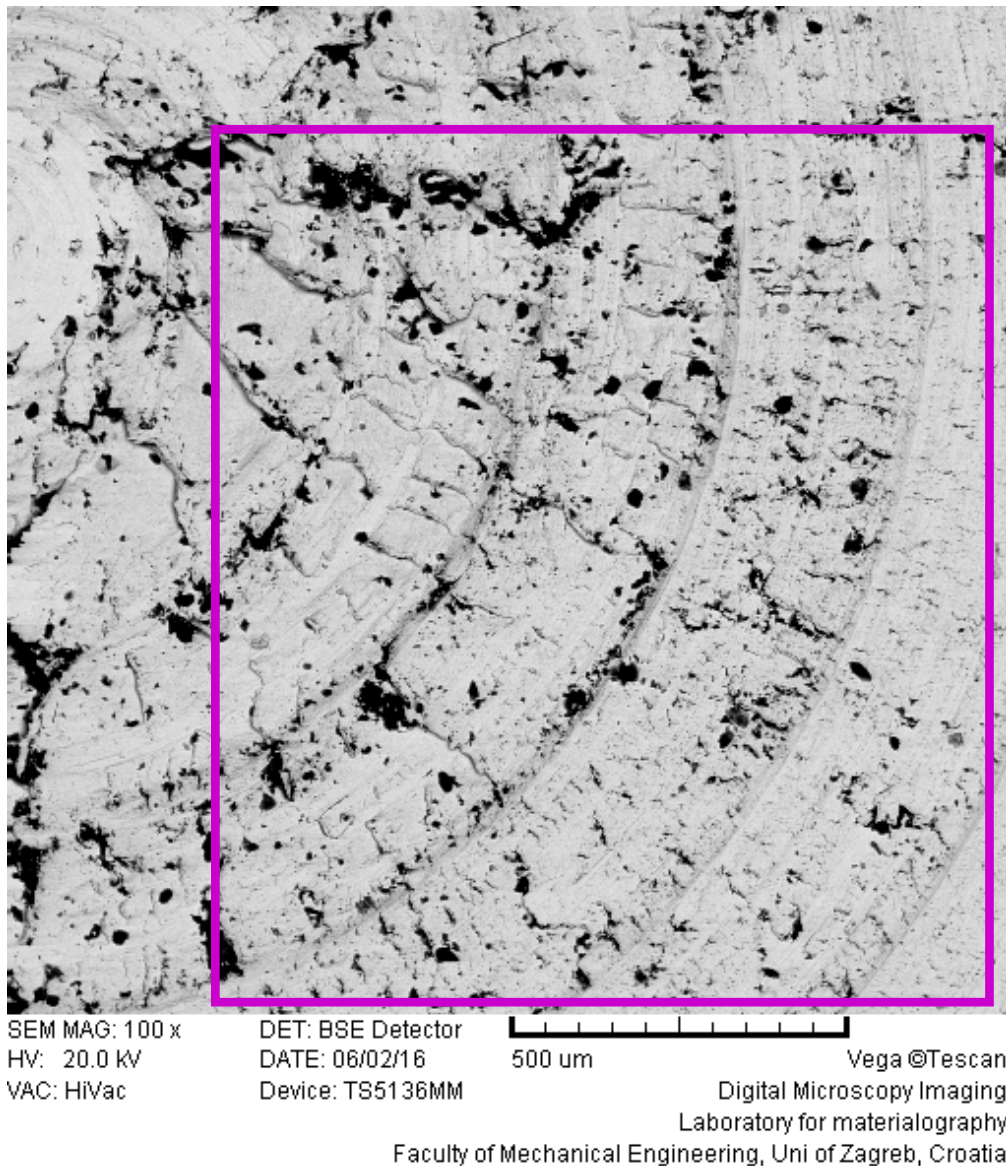
Slika 5.26. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje emulzijom



Slika 5.27. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje emulzijom nakon izlaganja elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, 30 min)



Slika 5.28. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi



Slika 5.29. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi nakon izlaganja elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, 30 min)

Tablica 5.9. Rezultati mikrokemijske analize površina uzoraka

| Element | Osnovni (neobrađeni) | | Tokareni, emulzija | | Tokareni, vrtložna cijev | |
|---------|----------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| | Prije testa, % | Po testu, % | Prije testa, % | Po testu, % | Prije testa, % | Po testu, % |
| Fe | 67,36 | 68,7 | 59,7 | 61,26 | 69,19 | 66,53 |
| C | 21,73 | 16,5 | 24,63 | 24,14 | 15,99 | 18,57 |
| Cr | 10,57 | 10,46 | 9,74 | 9,83 | 11,27 | 10,8 |
| O | - | 2,83 | 3,73 | 3,35 | 2,22 | 3,03 |
| Mn | - | 0,91 | 0,78 | 0,75 | 0,74 | 0,64 |
| Si | 0,35 | 0,36 | 0,42 | 0,28 | 0,36 | 0,44 |
| Ni | - | - | - | 0,40 | - | - |
| Ca | - | - | 0,38 | - | - | - |
| Al | - | - | 0,37 | - | - | - |
| Na | - | 0,23 | - | - | - | - |
| Cl | - | - | 0,24 | - | 0,22 | - |

EDS analiza uzorka u osnovnom (neobrađenom) stanju (OS1), uzorka tokarenog uz hlađenje emulzijom (EC1) i uzorka tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi (VC1) je pokazala prisutnost elemenata koji su u sastavu ispitnog materijala kao i ostale elemente prisutne zbog sastava elektrolita ili emulzije. Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.1, za korozijsku je otpornost općenito poželjan što viši sadržaj kroma (Cr) uz što niži sadržaj ugljika (C) koji s kromom tvori štetni kromov karbid. Također je važan i što viši sadržaj kisika (O) koji s kromom tvori pasivni film i pomaže njegovom samo-obnavljanju nakon obrade rezanjem.

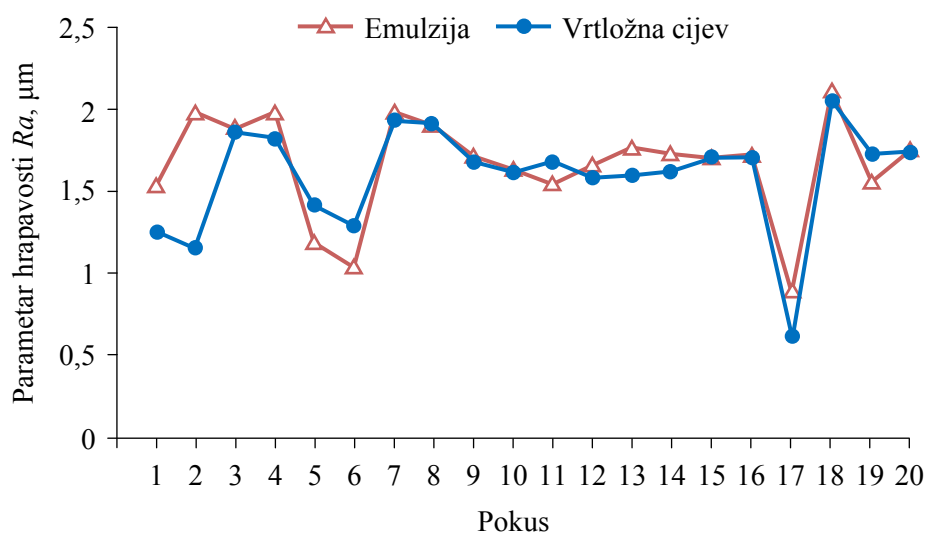
U usporedbi s uzorkom OS1, uzorak VC1 je imao viši sadržaj Cr i O dok je sadržaj C nakon obrade tokarenjem bio niži, a nakon izlaganja elektrolitu viši. Nadalje, u usporedbi s uzorkom EC1, uzorak VC1 je imao viši sadržaj Cr, nešto niži sadržaj O i znatno niži sadržaj C. Prema tome, rezultati SEM/EDS analize navode na zaključak da hlađenje vrtložnom cijevi u usporedbi s hlađenjem emulzijom pri tokarenju ispitnog materijala X20Cr13 ne pogoršava (smanjuje) njegovu korozijsku otpornost.

5.2.4. Rezultati obradivosti – hrapavost obrađene površine

Tablica 5.10 prikazuje rezultate mjerenja hrapavosti obrađene površine kod tokarenja uz hlađenje emulzijom odnosno vrtložnom cijevi, a njihovu usporedbu dijagram na slici 5.30.

Tablica 5.10. Rezultati mjerenja hrapavosti obrađene površine

| Pokus | Brzina rezanja v_c , m/min | Posmak f_s , mm/o | Dubina rezanja a_p , mm | Parametar hrapavosti Ra , μm | |
|-------|---------------------------------|------------------------|------------------------------|---|----------------|
| | | | | Emulzija | Vrtložna cijev |
| 1 | 170 | 0,2 | 0,3 | 1,530 | 1,249 |
| 2 | 270 | 0,2 | 0,3 | 1,979 | 1,151 |
| 3 | 170 | 0,4 | 0,3 | 1,873 | 1,857 |
| 4 | 270 | 0,4 | 0,3 | 1,973 | 1,822 |
| 5 | 170 | 0,2 | 0,5 | 1,184 | 1,407 |
| 6 | 270 | 0,2 | 0,5 | 1,032 | 1,291 |
| 7 | 170 | 0,4 | 0,5 | 1,978 | 1,931 |
| 8 | 270 | 0,4 | 0,5 | 1,895 | 1,911 |
| 9 | 220 | 0,3 | 0,4 | 1,706 | 1,670 |
| 10 | 220 | 0,3 | 0,4 | 1,621 | 1,616 |
| 11 | 220 | 0,3 | 0,4 | 1,533 | 1,675 |
| 12 | 220 | 0,3 | 0,4 | 1,645 | 1,576 |
| 13 | 220 | 0,3 | 0,4 | 1,763 | 1,592 |
| 14 | 220 | 0,3 | 0,4 | 1,721 | 1,612 |
| 15 | 136 | 0,3 | 0,4 | 1,698 | 1,701 |
| 16 | 304 | 0,3 | 0,4 | 1,704 | 1,699 |
| 17 | 220 | 0,13 | 0,4 | 0,881 | 0,606 |
| 18 | 220 | 0,47 | 0,4 | 2,104 | 2,034 |
| 19 | 220 | 0,3 | 0,23 | 1,550 | 1,715 |
| 20 | 220 | 0,3 | 0,57 | 1,741 | 1,727 |

**Slika 5.30.** Usporedba rezultata mjerenja hrapavosti obrađene površine

Može se uočiti da je u četrnaest od dvadeset provedenih pokusa (70 %) parametar Ra bio manji kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi što je pokazatelj bolje korozijske otpornosti obrađene površine. Također, značajno niže hrapavosti kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi u odnosu na tokarenje uz hlađenje emulzijom su bile postignute pri malim posmacima u kombinaciji s malim ili srednjim dubinama rezanja.

Nakon testiranja nulte hipoteze o jednakosti varijanci $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ pomoću F -testa, moguće je koristiti Studentov t -test kako bi se utvrdilo da li se dva skupa podataka o hrapavosti obrađene površine u tablici 5.10 značajno razlikuju. U tu je svrhu korišten alat za analizu podataka u Microsoft Excel-u. Budući da je u tablici 5.11 izračunata vrijednost F manja od tablične vrijednosti kritičnog F (ćelija " F Critical one-tail") za stupanj slobode brojnika 19 i nazivnika 19 i da je P -vrijednost (ćelija " $P(F \leq f)$ one-tail") veća od razine značajnosti (rizika) 5 % ($\alpha = 0,05$), razumno je prihvatiti hipotezu H_0 kao istinitu. Drugim riječima, procjene varijanci ne razlikuju se značajno. Također, za izračunatu vrijednost t (ćelija " t Stat") u tablici 5.12 vrijedi $-t$ Critical two-tail $< t$ Stat $< t$ Critical two-tail odnosno P -vrijednost $> \alpha$. Stoga je razumno prihvatiti nultu hipotezu $H_0 : \mu_1 = \mu_2$, dakle zaključiti da se sredine mjenog parametra površinske hrapavosti Ra u dvije grupe ne razlikuju značajno. Prema tome, primijenjene metode hlađenja (emulzija i vrtložna cijev) ne utječu značajno na hrapavost obrađene površine ispitnog materijala X20Cr13 i time na korozijsku otpornost.

Tablica 5.11. F -test dva uzorka Ra

| | Vrtložna cijev | Emulzija |
|------------------------|----------------|----------|
| Mean | 1,5921 | 1,65555 |
| Variance | 0,106064 | 0,099961 |
| Observations | 20 | 20 |
| df | 19 | 19 |
| F | 1,061056 | |
| $P(F \leq f)$ one-tail | 0,449285 | |
| F Critical one-tail | 2,168252 | |

Tablica 5.12. Studentov t -test dva uzorka Ra

| | Vrtložna cijev | Emulzija |
|------------------------------|----------------|----------|
| Mean | 1,5921 | 1,65555 |
| Variance | 0,106064 | 0,099961 |
| Observations | 20 | 20 |
| Pooled Variance | 0,103012 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 38 | |
| t Stat | -0,62515 | |
| $P(T \leq t)$ one-tail | 0,267803 | |
| t Critical one-tail | 1,685954 | |
| $P(T \leq t)$ two-tail | 0,535606 | |
| t Critical two-tail | 2,024394 | |

Višestrukom regresijskom analizom su dobiveni kodirani matematički modeli zavisnosti hrapavosti obrađene površine od parametara rezanja za tokarenje uz hlađenje emulzijom (EM) i vrtložnom cijevi (VC) koji su zatim dekodirani:

$$Ra_{(EM)} = 1,65555 + 0,29662X_2 + 0,165X_2X_3 \Rightarrow$$

$$Ra_{(EM)} = 2,7462 - 3,634f - 4,95a_p + 16,5fa_p, \quad (5.13)$$

$$Ra_{(VC)} = 1,66921 + 0,35328X_2 - 0,11293X_2^2 \Rightarrow$$

$$Ra_{(VC)} = -0,4068 + 10,3068f - 11,29f^2. \quad (5.14)$$

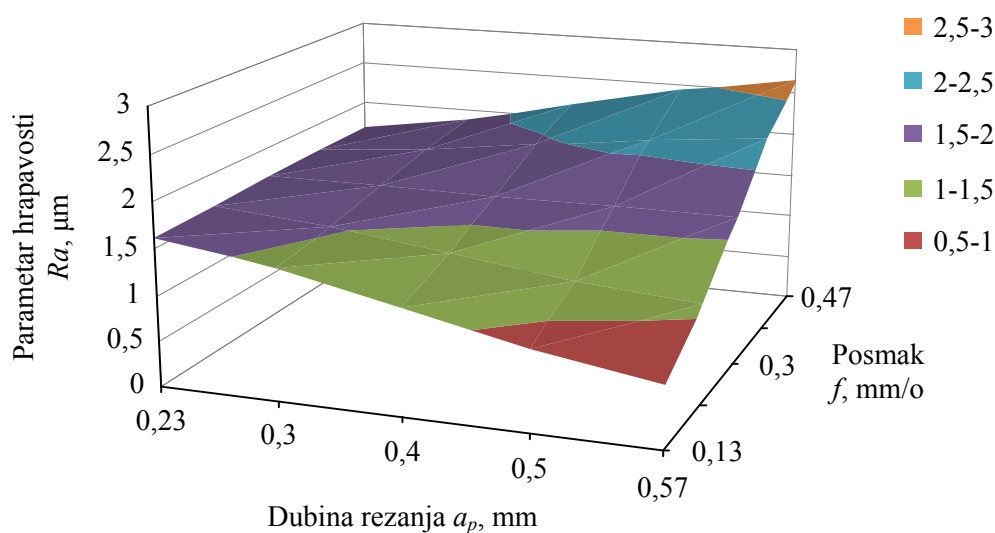
Rezultati višestruke regresijske analize (prema Microsoft Excel-u) za kodirane matematičke modele navedeni su u tablicama 5.13 i 5.14 dok je na slikama 5.31 i 5.32 dan grafički prikaz njihovih dekodiranih oblika.

Tablica 5.13. Višestruka regresijska analiza (Excel) za matematički model (5.13) u kodiranom obliku

| Regression Statistics | | | | | | |
|-----------------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------------|------------|
| Multiple R | 0,86447 | | | | | |
| R Square | 0,74731 | | | | | |
| Adjusted R Square | 0,71758 | | | | | |
| Standard Error | 0,16802 | | | | | |
| Observations | 20 | | | | | |
| ANOVA | | | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Significance F</i> | |
| Regression | 2 | 1,41933 | 0,70966 | 25,13788 | 8,35837E-06 | |
| Residual | 17 | 0,47992 | 0,02823 | | | |
| Total | 19 | 1,89925 | | | | |
| | Coefficient | Stand. Error | <i>t</i> Stat | <i>P</i> -value | Lower 95 % | Upper 95 % |
| Intercept | 1,65555 | 0,03757 | 44,06517 | 5,742E-19 | 1,57628 | 1,73482 |
| X_2 | 0,29662 | 0,04547 | 6,52386 | 5,203E-06 | 0,20069 | 0,39255 |
| X_2X_3 | 0,165 | 0,0594 | 2,77758 | 0,0129 | 0,03967 | 0,29033 |

Tablica 5.14. Višestruka regresijska analiza (Excel) za matematički model (5.14) u kodiranom obliku

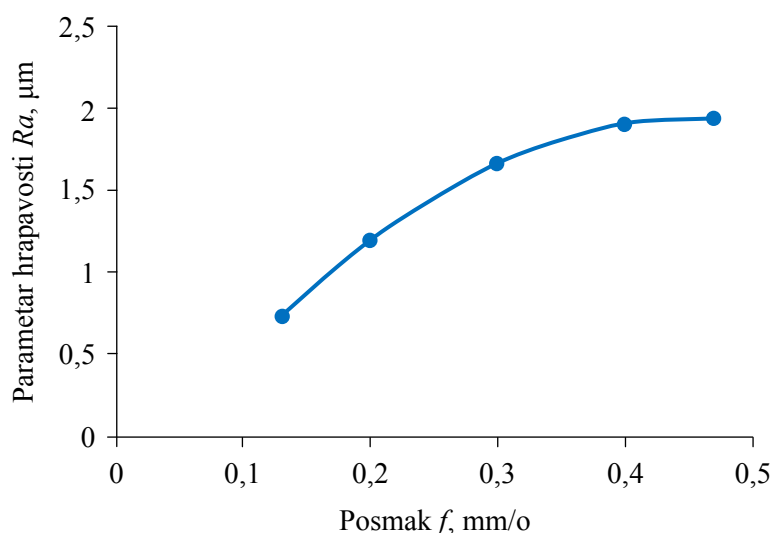
| Regression Statistics | | | | | | |
|--------------------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------------|------------|
| Multiple <i>R</i> | 0,96882 | | | | | |
| <i>R</i> Square | 0,93861 | | | | | |
| Adjusted <i>R</i> Square | 0,93138 | | | | | |
| Standard Error | 0,08531 | | | | | |
| Observations | 20 | | | | | |
| ANOVA | | | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Significance F</i> | |
| Regression | 2 | 1,89149 | 0,94575 | 129,95219 | 5,00049E-11 | |
| Residual | 17 | 0,12372 | 0,00728 | | | |
| Total | 19 | 2,01521 | | | | |
| | Coefficient | Stand. Error | <i>t</i> Stat | <i>P</i> -value | Lower 95 % | Upper 95 % |
| Intercept | 1,66921 | 0,0244 | 68,42247 | 3,374E-22 | 1,61774 | 1,72068 |
| X_2 | 0,35328 | 0,02309 | 15,30342 | 2,252E-11 | 0,30457 | 0,40198 |
| X_2^2 | -0,11293 | 0,02227 | -5,07047 | 9,458E-05 | -0,15992 | -0,06594 |

**Slika 5.31.** Zavisnost hrapavosti obrađene površine od parametara rezanja prema matematičkom modelu (5.13) za tokarenje ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje emulzijom

S obzirom na tokarenje uz hlađenje emulzijom, višestrukom regresijskom analizom je utvrđeno da brzina rezanja ne utječe značajno na rezultate hrapavosti i stoga je izostavljena iz

matematičkog modela (5.13). Vrijednost koeficijenta determinacije (R Square) u tablici 5.13 je visoka što znači da matematički model dobro opisuje proces. Ovdje hrapavost zavisi od posmaka, dubine rezanja i interakcije posmaka i dubine rezanja. Iz grafičkog prikaza na slici 5.31 je razvidno da se najmanja hrapavost obrađene površine postiže uz kombinaciju najmanjeg posmaka i najveće dubine rezanja.

S obzirom na tokarenje uz hlađenje vrtložnom cijevi, višestrukom regresijskom analizom je utvrđeno da brzina i dubina rezanja ne utječu značajno na rezultate hrapavosti i stoga su izostavljene iz matematičkog modela (5.14). S obzirom na vrlo visoku vrijednost koeficijenta determinacije (R Square) u tablici 5.14 koji je blizu jedan, proces je uspješno opisan matematičkim modelom. U ovom slučaju hrapavost zavisi samo od posmaka (linearni i kvadratni utjecaj). Iz grafičkog prikaza na slici 5.32 je razvidno da se najmanja hrapavost obrađene površine postiže uz najmanji posmak.



Slika 5.32. Zavisnost hrapavosti obrađene površine od parametara rezanja prema matematičkom modelu (5.14) za tokarenje ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje vrtložnom cijevi

5.2.5. Rezultati obradivosti – postojanost alata

Tablice 5.15 i 5.16 prikazuju rezultate mjerenja trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje emulzijom odnosno vrtložnom cijevi. Zbog jasnije usporedbe, u dijagramima na slikama 5.34 – 5.52 je za svaki pokus prikazano trošenje alata kod obje metode hlađenja na polovici i na kraju prolaza.

Tablica 5.15. Rezultati mjerenja trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje emulzijom

| Pokus | Brzina rezanja v_c , m/min | Posmak f , mm/o | Dubina rezanja a_p , mm | Vrijeme t , min | Trošenje VB , mm |
|-------|---------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 170 | 0,2 | 0,3 | t_1 2,3 | VB_1 0,499 |
| | | | | t_2 3,28 | VB_2 0,607 |
| 2 | 270 | 0,2 | 0,3 | t_1 1,04 | VB_1 0,218 |
| | | | | t_2 1,48 | VB_2 0,723 |
| 3 | 170 | 0,4 | 0,3 | t_1 1,15 | VB_1 0,41 |
| | | | | t_2 1,42 | VB_2 0,704 |
| 4 | 270 | 0,4 | 0,3 | t_1 0,64 | VB_1 0,49 |
| | | | | t_2 0,8 | VB_2 0,74 |
| 5 | 170 | 0,2 | 0,5 | t_1 1,26 | VB_1 0,414 |
| | | | | t_2 1,68 | VB_2 0,609 |
| 6 | 270 | 0,2 | 0,5 | t_1 1,2 | VB_1 0,489 |
| | | | | t_2 1,35 | VB_2 0,558 |
| 7 | 170 | 0,4 | 0,5 | t_1 0,51 | VB_1 0,138 |
| | | | | t_2 0,84 | VB_2 0,598 |
| 8 | 270 | 0,4 | 0,5 | t_1 0,3 | VB_1 0,25 |
| | | | | t_2 0,4 | VB_2 0,75 |
| 9 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,52 | VB_1 0,19 |
| | | | | t_2 0,96 | VB_2 0,53 |
| 10 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,51 | VB_1 0,174 |
| | | | | t_2 0,83 | VB_2 0,581 |
| 11 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,5 | VB_1 0,176 |
| | | | | t_2 0,95 | VB_2 0,5 |
| 12 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,51 | VB_1 0,178 |
| | | | | t_2 0,94 | VB_2 0,53 |
| 13 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,5 | VB_1 0,2 |
| | | | | t_2 0,86 | VB_2 0,54 |
| 14 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,52 | VB_1 0,19 |
| | | | | t_2 0,84 | VB_2 0,57 |
| 15 | 136 | 0,3 | 0,4 | t_1 1,23 | VB_1 0,392 |
| | | | | t_2 1,9 | VB_2 0,561 |
| 16 | 30 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,55 | VB_1 0,34 |
| | | | | t_2 0,75 | VB_2 0,64 |
| 17 | 220 | 0,13 | 0,4 | t_1 2,25 | VB_1 0,42 |
| | | | | t_2 2,68 | VB_2 0,53 |
| 18 | 220 | 0,47 | 0,4 | t_1 0,32 | VB_1 0,31 |
| | | | | t_2 0,54 | VB_2 0,52 |

Tablica 5.15. (nastavak)

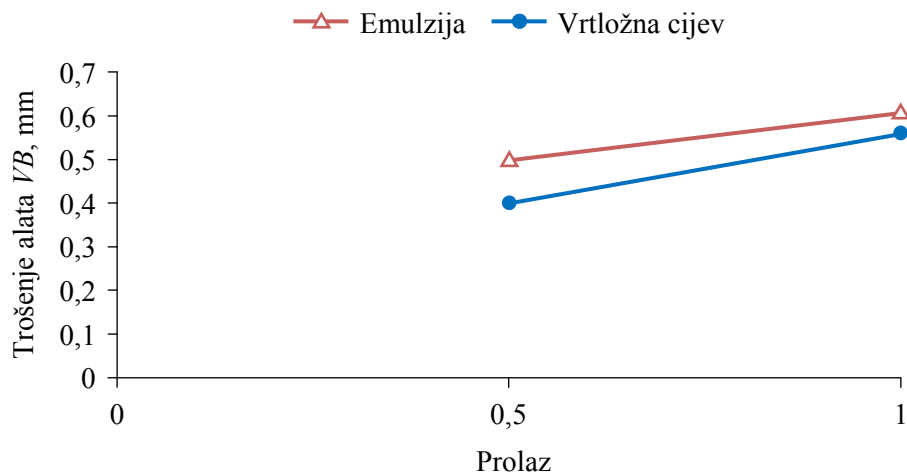
| Pokus | Brzina rezanja v_c , m/min | Posmak f , mm/o | Dubina rezanja a_p , mm | Vrijeme t , min | Trošenje VB , mm |
|-------|---------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 19 | 220 | 0,3 | 0,23 | t_1 1,27 | VB_1 0,35 |
| | | | | t_2 1,65 | VB_2 0,699 |
| 20 | 220 | 0,3 | 0,57 | t_1 0,59 | VB_1 0,457 |
| | | | | t_2 0,8 | VB_2 0,51 |

Tablica 5.16. Rezultati mjerenja trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi

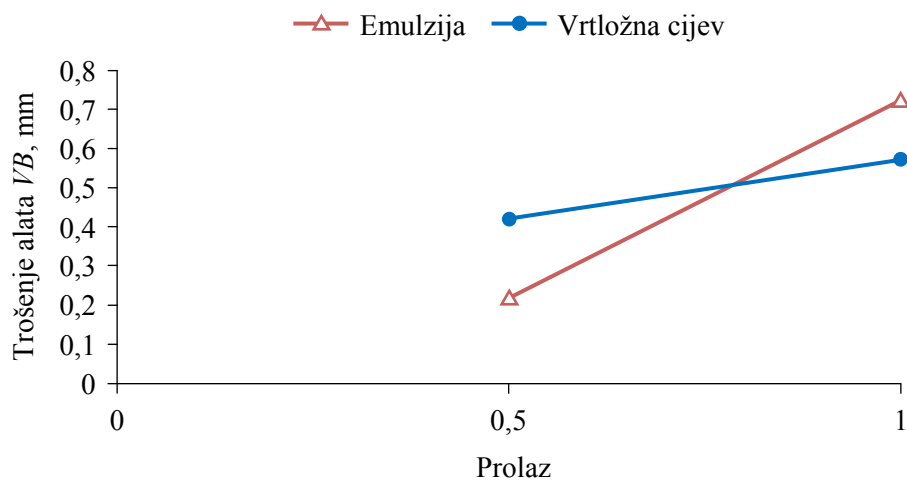
| Pokus | Brzina rezanja v_c , m/min | Posmak f , mm/o | Dubina rezanja a_p , mm | Vrijeme t , min | Trošenje VB , mm |
|-------|---------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 170 | 0,2 | 0,3 | t_1 1,12 | VB_1 0,345 |
| | | | | t_2 2,8 | VB_2 0,44 |
| | | | | t_3 3,5 | VB_3 0,56 |
| 2 | 270 | 0,2 | 0,3 | t_1 0,44 | VB_1 0,396 |
| | | | | t_2 0,8 | VB_2 0,498 |
| | | | | t_3 0,87 | VB_3 0,572 |
| 3 | 170 | 0,4 | 0,3 | t_1 0,35 | VB_1 0,38 |
| | | | | t_2 0,6 | VB_2 0,45 |
| | | | | t_3 0,95 | VB_3 0,591 |
| 4 | 270 | 0,4 | 0,3 | t_1 0,13 | VB_1 0,47 |
| | | | | t_2 0,15 | VB_2 0,55 |
| | | | | t_3 0,2 | VB_3 0,694 |
| 5 | 170 | 0,2 | 0,5 | t_1 1,08 | VB_1 0,424 |
| | | | | t_2 1,9 | VB_2 0,435 |
| | | | | t_3 2,9 | VB_3 0,528 |
| 6 | 270 | 0,2 | 0,5 | t_1 0,3 | VB_1 0,479 |
| | | | | t_2 0,42 | VB_2 0,514 |
| | | | | t_3 0,68 | VB_3 0,57 |
| 7 | 170 | 0,4 | 0,5 | t_1 0,28 | VB_1 0,46 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,56 |
| | | | | t_3 0,32 | VB_3 0,786 |
| 8 | 270 | 0,4 | 0,5 | t_1 0,03 | VB_1 0,5 |
| | | | | t_2 0,05 | VB_2 0,57 |
| | | | | t_3 0,1 | VB_3 0,704 |
| 9 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,2 | VB_1 0,472 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,56 |
| | | | | t_3 0,45 | VB_3 0,602 |

Tablica 5.16. (nastavak)

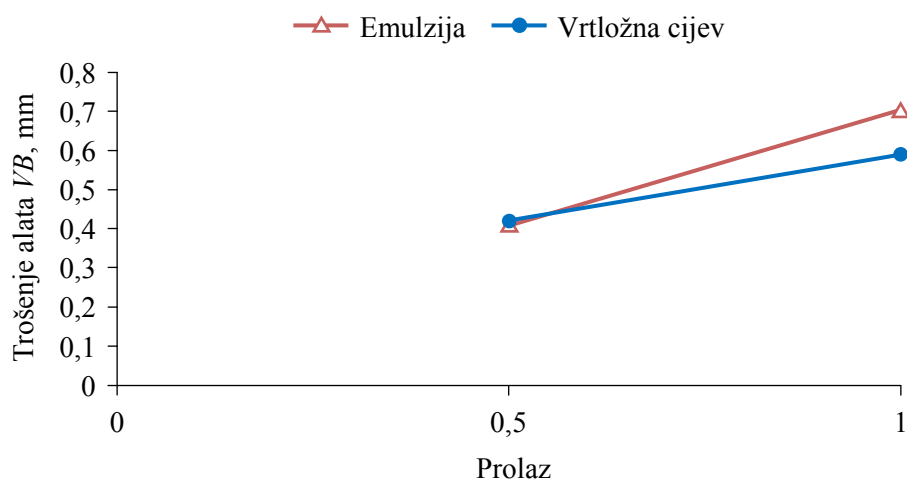
| Pokus | Brzina rezanja v_c , m/min | Posmak f , mm/o | Dubina rezanja a_p , mm | Vrijeme t , min | Trošenje VB , mm |
|-------|---------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 10 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,25 | VB_1 0,496 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,556 |
| | | | | t_3 0,34 | VB_3 0,598 |
| 11 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,25 | VB_1 0,391 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,544 |
| | | | | t_3 0,58 | VB_3 0,677 |
| 12 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,25 | VB_1 0,402 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,545 |
| | | | | t_3 0,6 | VB_3 0,77 |
| 13 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,2 | VB_1 0,495 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,55 |
| | | | | t_3 0,38 | VB_3 0,67 |
| 14 | 220 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,2 | VB_1 0,43 |
| | | | | t_2 0,3 | VB_2 0,55 |
| | | | | t_3 0,54 | VB_3 0,68 |
| 15 | 136 | 0,3 | 0,4 | t_1 1,52 | VB_1 0,408 |
| | | | | t_2 1,7 | VB_2 0,55 |
| | | | | t_3 2,2 | VB_3 0,688 |
| 16 | 304 | 0,3 | 0,4 | t_1 0,1 | VB_1 0,48 |
| | | | | t_2 0,11 | VB_2 0,584 |
| | | | | t_3 0,14 | VB_3 0,715 |
| 17 | 220 | 0,13 | 0,4 | t_1 1,1 | VB_1 0,325 |
| | | | | t_2 3,47 | VB_2 0,45 |
| | | | | t_3 3,7 | VB_3 0,75 |
| 18 | 220 | 0,47 | 0,4 | t_1 0,1 | VB_1 0,482 |
| | | | | t_2 0,11 | VB_2 0,615 |
| | | | | t_3 0,12 | VB_3 0,776 |
| 19 | 220 | 0,3 | 0,23 | t_1 0,32 | VB_1 0,425 |
| | | | | t_2 0,4 | VB_2 0,525 |
| | | | | t_3 0,54 | VB_3 0,65 |
| 20 | 220 | 0,3 | 0,57 | t_1 0,2 | VB_1 0,442 |
| | | | | t_2 0,31 | VB_2 0,55 |
| | | | | t_3 0,36 | VB_3 0,759 |



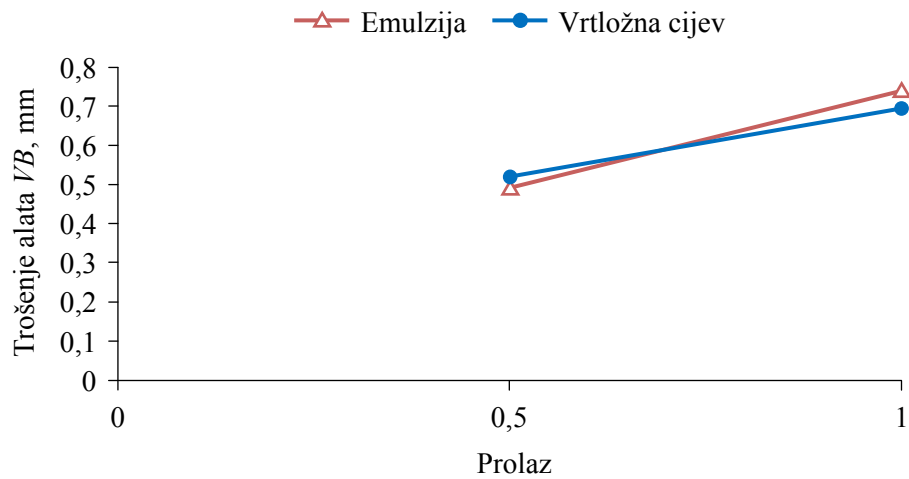
Slika 5.33. Trošenje alata u pokusu 1 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm)



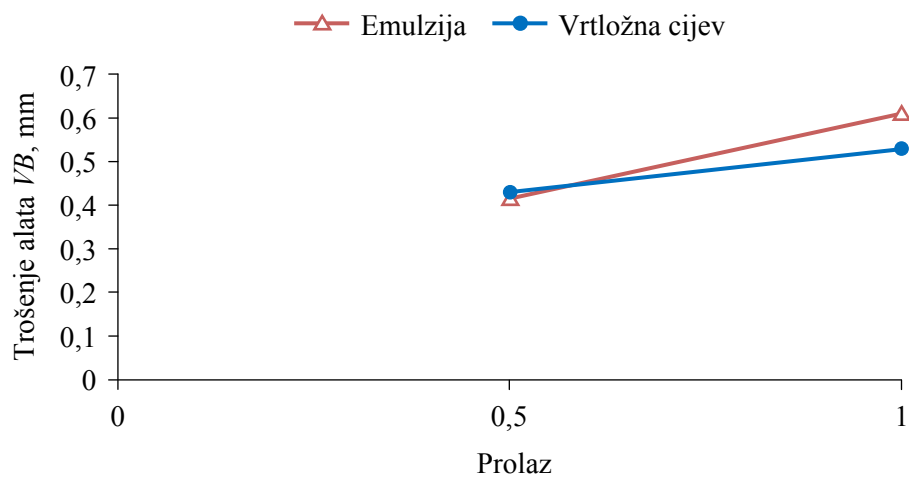
Slika 5.34. Trošenje alata u pokusu 2 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm)



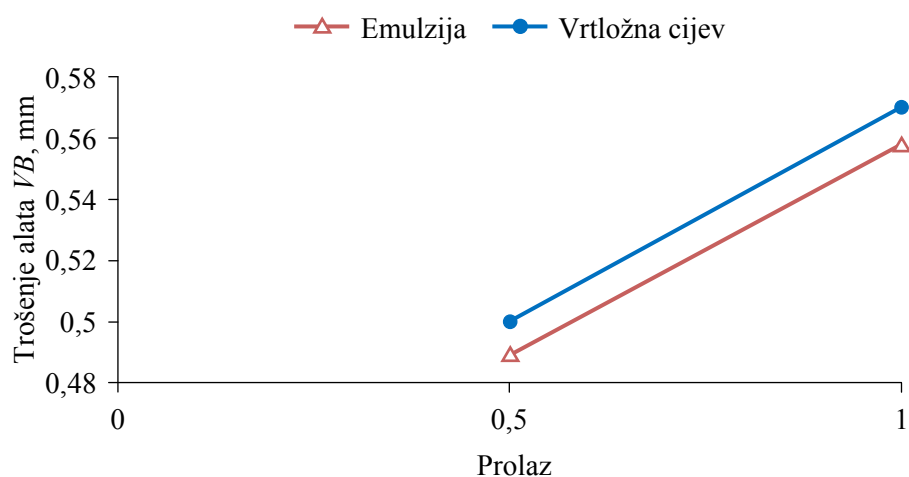
Slika 5.35. Trošenje alata u pokusu 3 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm)



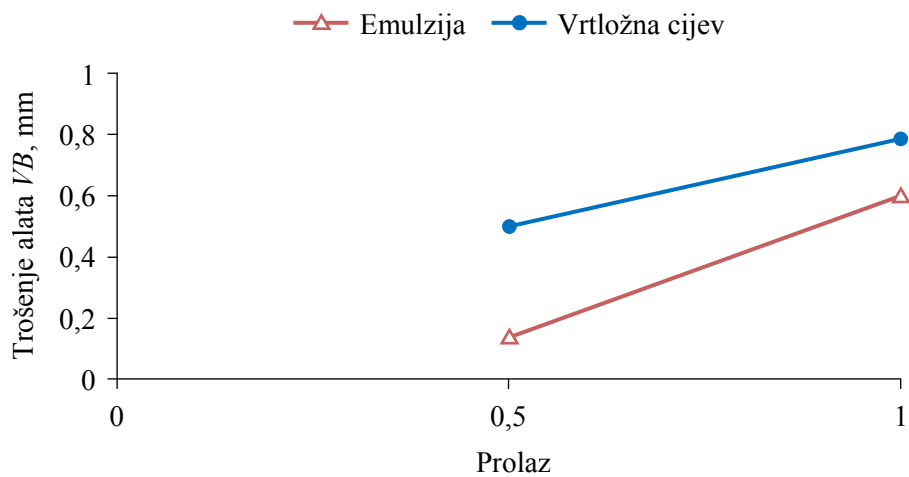
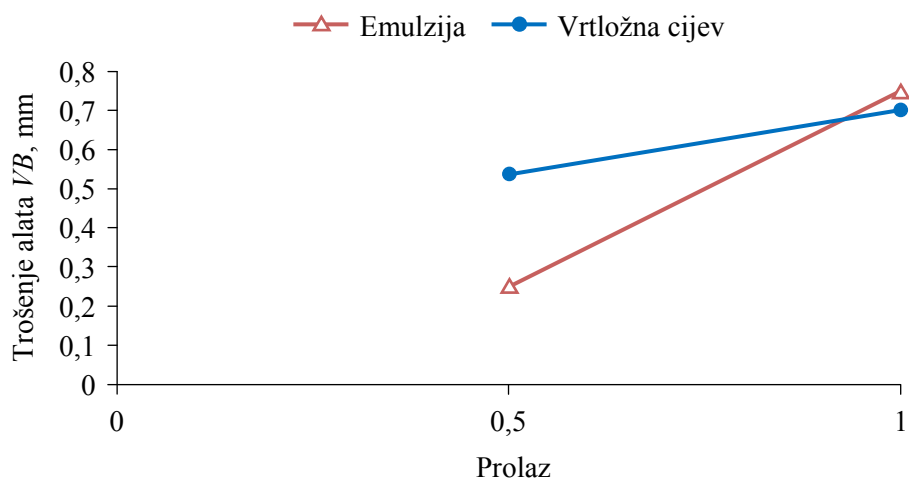
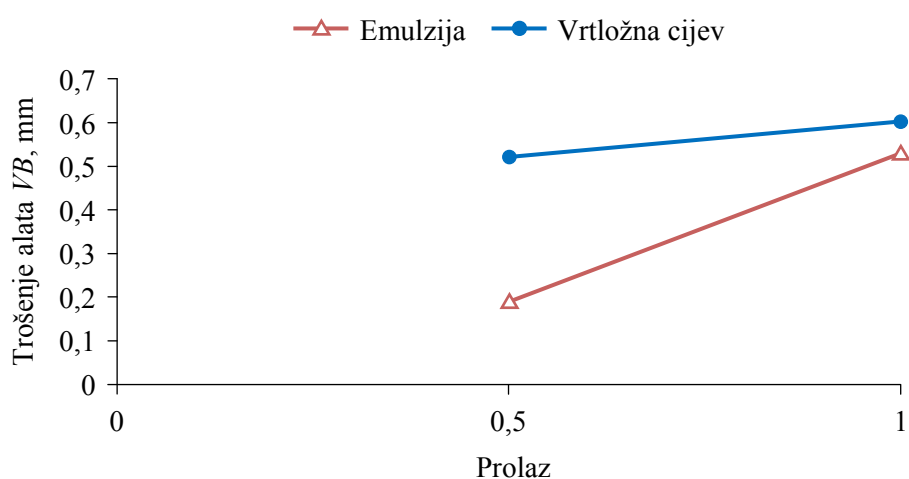
Slika 5.36. Trošenje alata u pokusu 4 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm)

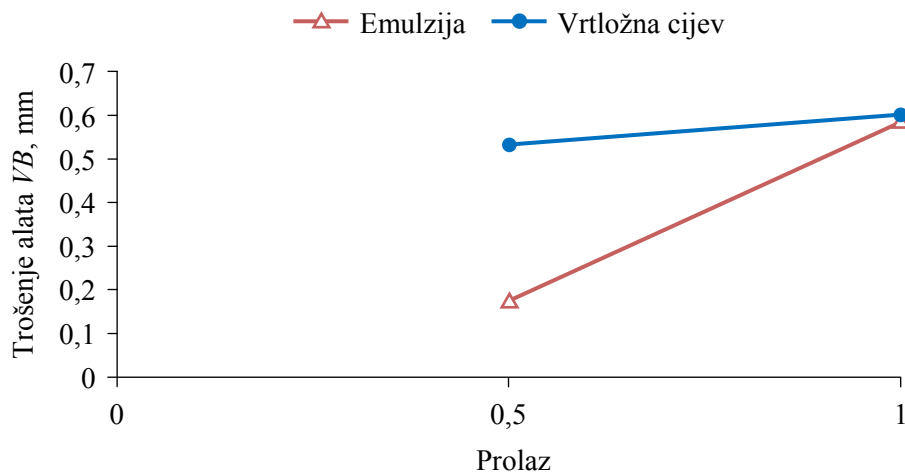
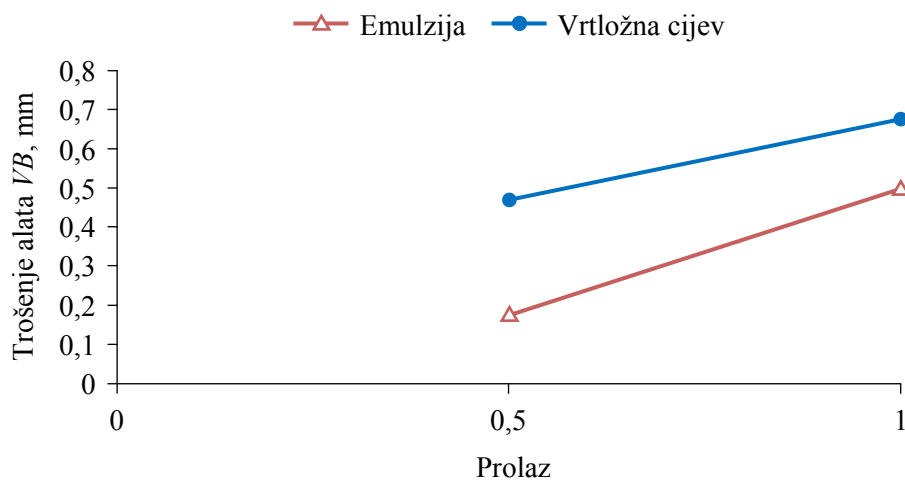
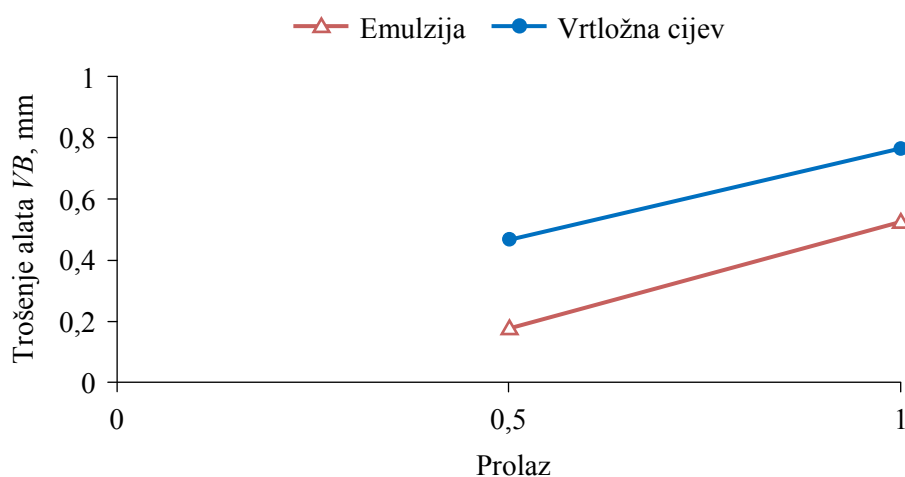


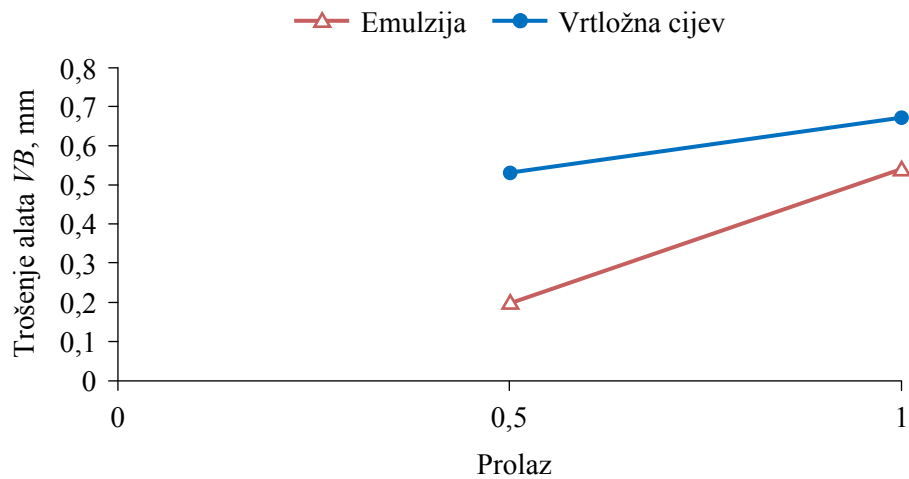
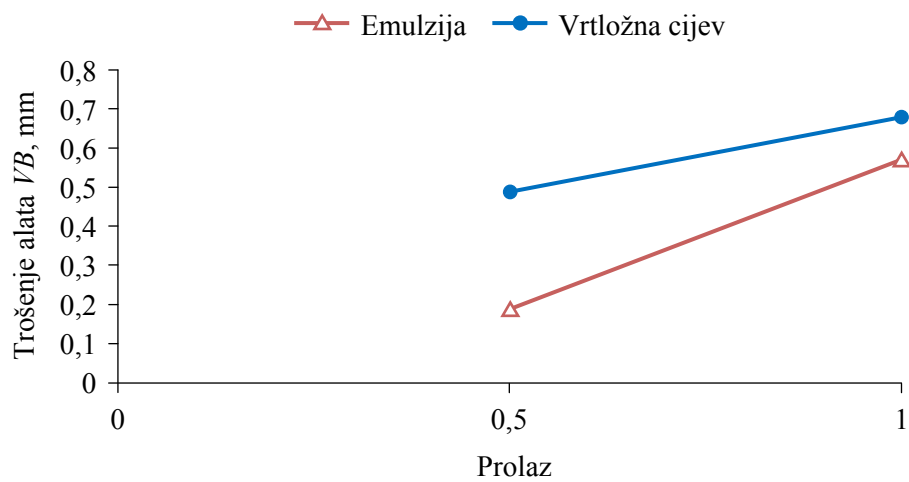
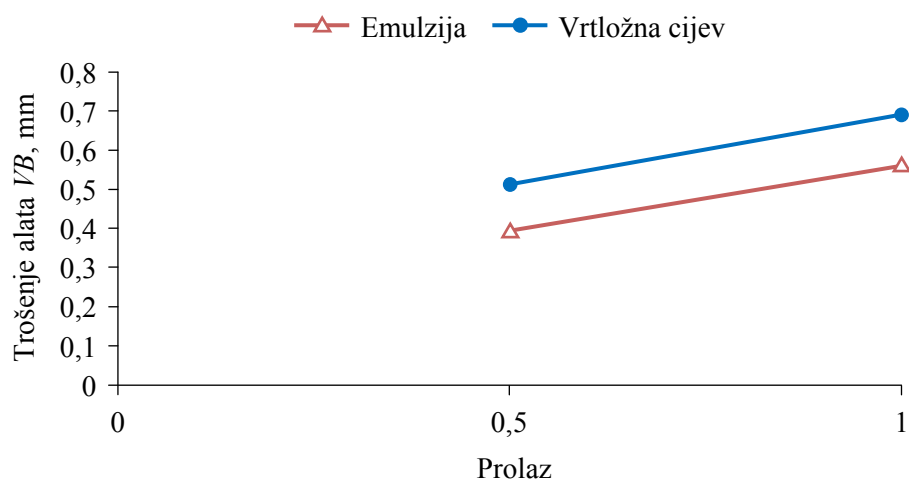
Slika 5.37. Trošenje alata u pokusu 5 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm)

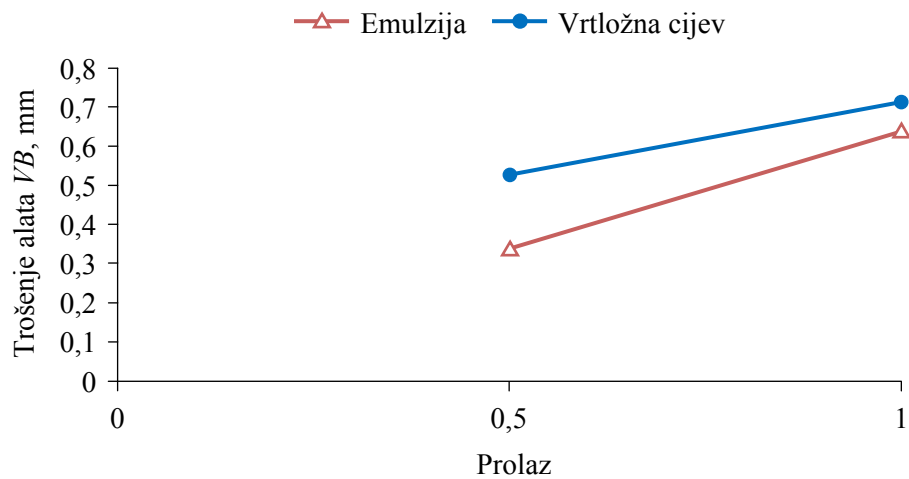
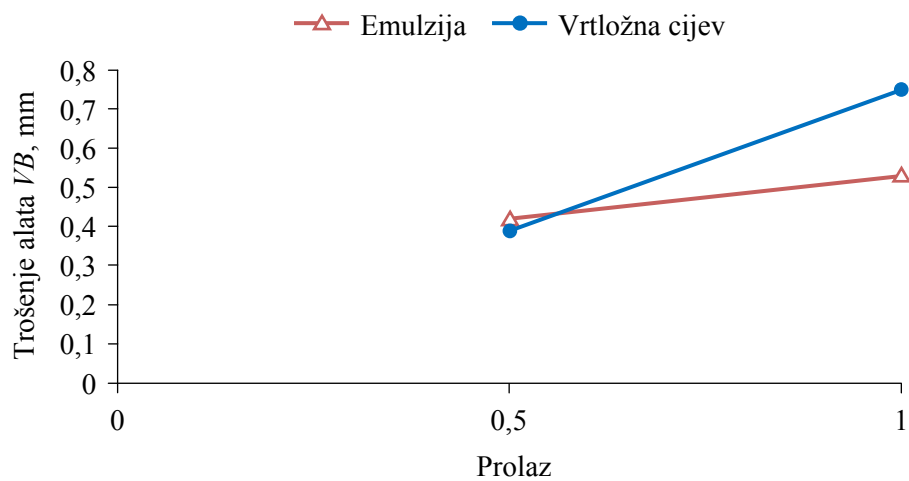
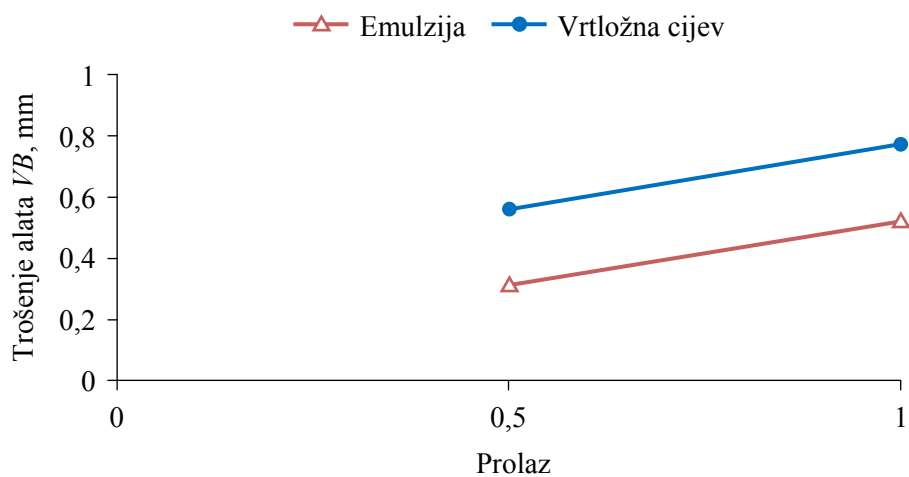


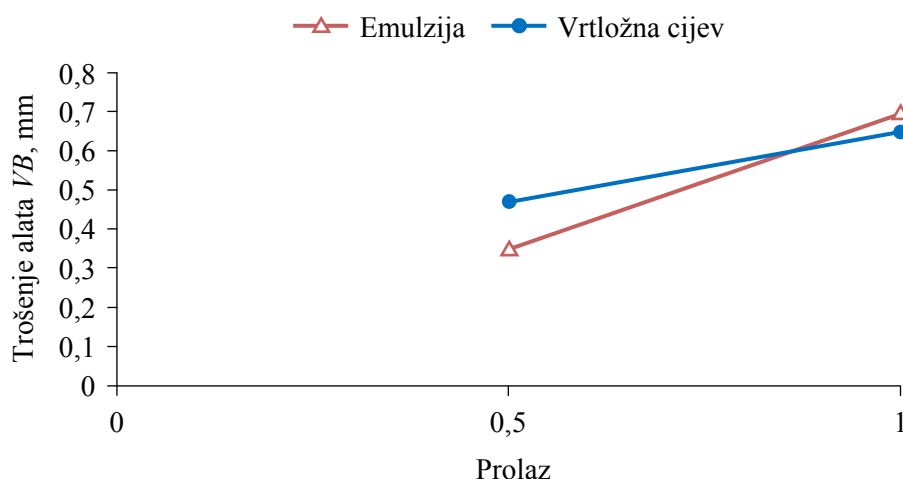
Slika 5.38. Trošenje alata u pokusu 6 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm)

**Slika 5.39.** Trošenje alata u pokusu 7 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm)**Slika 5.40.** Trošenje alata u pokusu 8 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm)**Slika 5.41.** Trošenje alata u pokusu 9 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)

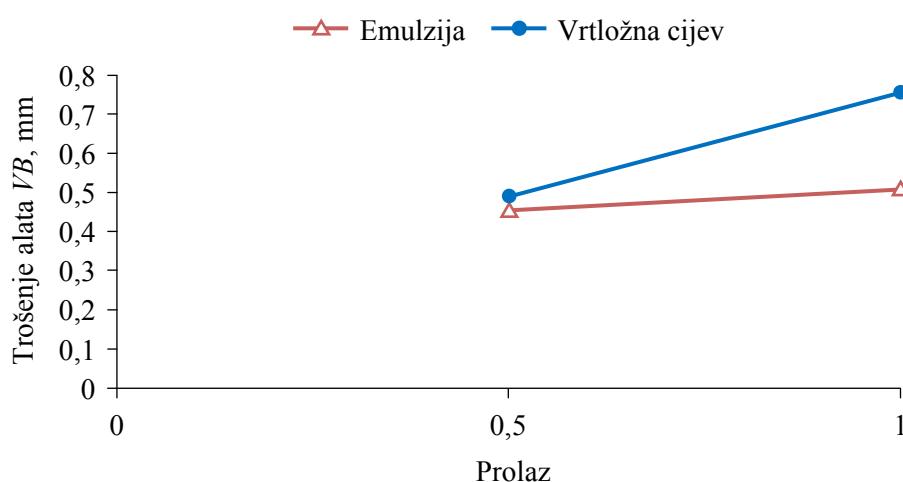
**Slika 5.42.** Trošenje alata u pokusu 10 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)**Slika 5.43.** Trošenje alata u pokusu 11 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)**Slika 5.44.** Trošenje alata u pokusu 12 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)

**Slika 5.45.** Trošenje alata u pokusu 13 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)**Slika 5.46.** Trošenje alata u pokusu 14 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)**Slika 5.47.** Trošenje alata u pokusu 15 ($v_c = 136$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)

**Slika 5.48.** Trošenje alata u pokusu 16 ($v_c = 304$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)**Slika 5.49.** Trošenje alata u pokusu 17 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,13$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)**Slika 5.50.** Trošenje alata u pokusu 18 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,47$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm)



Slika 5.51. Trošenje alata u pokusu 19 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,23$ mm)



Slika 5.52. Trošenje alata u pokusu 20 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,57$ mm)

U sedam od dvadeset provedenih pokusa je na kraju prolaza zabilježeno manje trošenje alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi (najizrazitije kod nižih posmaka u kombinaciji s nižim dubinama rezanja), a u još tri pokusa je trošenje alata bilo vrlo blizu onome kod tokarenja uz hlađenje emulzijom. Veće trošenje alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi se može jednostavno izbjeći primjenom kvalitetnijeg materijala alata. Međutim, zanimljivo je opažanje da je na polovici prolaza u čak osamnaest od dvadeset pokusa bilo veće trošenje alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi, da bi nakon toga u četrnaest od tih osamnaest pokusa nagib odnosnog pravca trošenja alata bio manji od nagiba pravca trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje emulzijom. Ovo navodi na zaključak da se alat kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi usporedbeno sporije troši. Vjerojatni razlog je što se polijevanje obratka i alata emulzijom uključuje prije ulaza alata u zahvat pa se na početku tokarenja formira granični podmazujući film. Kada zbog velikog specifičnog pritiska i

temperature u zoni rezanja podmazivanje izgubi svoju učinkovitost, emulzija više ne može osigurati dovoljno brzo odvođenje topline u slučaju ispitnog materijala niske toplinske vodljivosti i alat se onda brže troši. Dakle, komprimirani zrak ohlađen na $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ je u ovim pokusima bolje obavio funkciju hlađenja.

Rezultati postojanosti alata za kriterij istrošenosti njegove stražnje površine $VB = 0,5\text{ mm}$ prikazani su u tablici 5.17. Za provođenje višestruke regresijske analize nije potrebno kodiranje parametara rezanja jer se eksponencijalna zavisnost u proširenoj Taylorovoj jednadžbi postojanosti alata logaritmiranjem pretvara u linearnu. Rezultati višestruke regresijske analize (prema Microsoft Excel-u) navedeni u tablicama 5.18 i 5.19 daju sljedeće

Tablica 5.17. Rezultati postojanosti alata ($VB = 0,5\text{ mm}$)

| Pokus | Brzina rezanja v_c , m/min | Posmak f_s , mm/o | Dubina rezanja a_p , mm | Postojanost alata T , min | |
|-------|---------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | | | | Emulzija | Vrtložna cijev |
| 1 | 170 | 0,2 | 0,3 | 3,28 | 3,5 |
| 2 | 270 | 0,2 | 0,3 | 1,48 | 0,87 |
| 3 | 170 | 0,4 | 0,3 | 1,42 | 0,95 |
| 4 | 270 | 0,4 | 0,3 | 0,8 | 0,2 |
| 5 | 170 | 0,2 | 0,5 | 1,68 | 2,9 |
| 6 | 270 | 0,2 | 0,5 | 1,35 | 0,68 |
| 7 | 170 | 0,4 | 0,5 | 0,84 | 0,32 |
| 8 | 270 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,1 |
| 9 | 220 | 0,3 | 0,4 | 0,96 | 0,45 |
| 10 | 220 | 0,3 | 0,4 | 0,83 | 0,34 |
| 11 | 220 | 0,3 | 0,4 | 0,95 | 0,58 |
| 12 | 220 | 0,3 | 0,4 | 0,94 | 0,6 |
| 13 | 220 | 0,3 | 0,4 | 0,86 | 0,38 |
| 14 | 220 | 0,3 | 0,4 | 0,84 | 0,54 |
| 15 | 136 | 0,3 | 0,4 | 1,9 | 2,2 |
| 16 | 304 | 0,3 | 0,4 | 0,75 | 0,14 |
| 17 | 220 | 0,13 | 0,4 | 2,68 | 3,7 |
| 18 | 220 | 0,47 | 0,4 | 0,54 | 0,12 |
| 19 | 220 | 0,3 | 0,23 | 1,65 | 0,54 |
| 20 | 220 | 0,3 | 0,57 | 0,8 | 0,36 |

matematičke modele postojanosti alata za tokarenje uz hlađenje emulzijom (EM) i vrtložnom cijevi (VC):

$$T_{(EM)} = e^{4,395} v_c^{-1,248} f^{-1,232} a_p^{-0,92}, \quad (5.15)$$

$$T_{(VC)} = e^{12,65} v_c^{-3,194} f^{-2,562} a_p^{-0,797}. \quad (5.16)$$

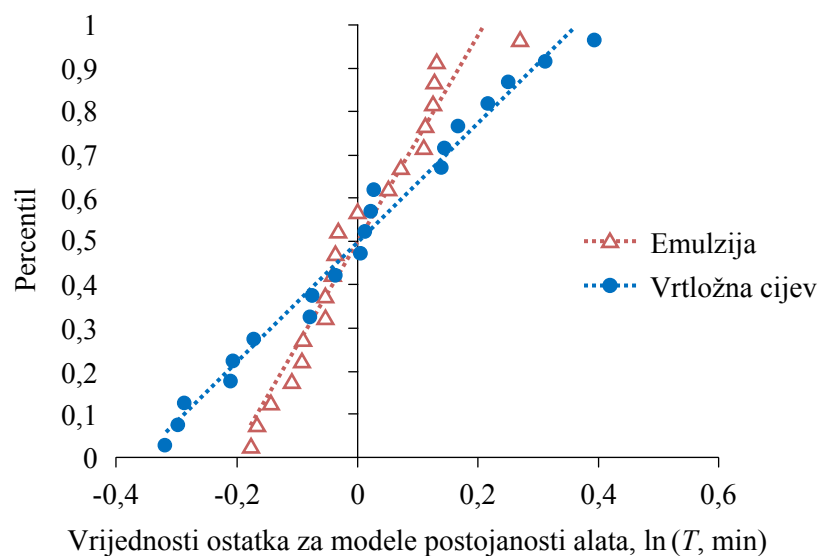
Vrijednosti koeficijenta determinacije (*R Square*) u tablicama 5.18 i 5.19. su visoke i blizu jedan što znači da se matematički modeli mogu uspješno primijeniti za predviđanje postojanosti alata. Također, prema grafičkom prikazu zavisnosti normalne vjerojatnosti od vrijednosti ostataka na slici 5.53, pogreške se mogu procijeniti kao normalno raspodijeljene pa su dobiveni matematički modeli adekvatni. Iz međusobne usporedbe eksponenata brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja slijedi da je u odnosu na tokarenje uz hlađenje emulzijom, kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi postojanost alata više osjetljiva na promjenu brzine rezanja i posmaka, a manje osjetljiva na promjenu dubine rezanja.

Tablica 5.18. Višestruka regresijska analiza (Excel) za model postojanosti alata (5.15)

| Regression Statistics | | | | | | |
|--------------------------|-------------|--------------|---------------|----------------|-----------------------|------------|
| Multiple <i>R</i> | 0,97278 | | | | | |
| <i>R Square</i> | 0,9463 | | | | | |
| Adjusted <i>R Square</i> | 0,93623 | | | | | |
| Standard Error | 0,13023 | | | | | |
| Observations | 20 | | | | | |
| ANOVA | | | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Significance F</i> | |
| Regression | 3 | 4,78117 | 1,59372 | 93,97654 | 2,25411E-10 | |
| Residual | 16 | 0,27134 | 0,01696 | | | |
| Total | 19 | 5,05251 | | | | |
| | Coefficient | Stand. Error | <i>t Stat</i> | <i>P-value</i> | Lower 95 % | Upper 95 % |
| Intercept | 4,39523 | 0,81997 | 5,3602 | 6,3774E-05 | 2,65696 | 6,13349 |
| <i>v_c</i> | -1,24774 | 0,14911 | -8,36792 | 3,07965E-07 | -1,56384 | -0,93164 |
| <i>f</i> | -1,23226 | 0,09568 | -12,8795 | 7,33571E-10 | -1,43508 | -1,02943 |
| <i>a_p</i> | -0,91959 | 0,13351 | -6,88787 | 3,64994E-06 | -1,20262 | -0,63657 |

Tablica 5.19. Višestruka regresijska analiza (Excel) za model postojanosti alata (5.16)

| Regression Statistics | | | | | | |
|--------------------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------------|------------|
| Multiple <i>R</i> | 0,98024 | | | | | |
| <i>R</i> Square | 0,96086 | | | | | |
| Adjusted <i>R</i> Square | 0,95352 | | | | | |
| Standard Error | 0,22825 | | | | | |
| Observations | 20 | | | | | |
| ANOVA | | | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Significance F</i> | |
| Regression | 3 | 20,46372 | 6,82124 | 130,93462 | 1,80592E-11 | |
| Residual | 16 | 0,83354 | 0,0521 | | | |
| Total | 19 | 21,29727 | | | | |
| | Coefficient | Stand. Error | <i>t</i> Stat | <i>P</i> -value | Lower 95 % | Upper 95 % |
| Intercept | 12,6499 | 1,43717 | 8,80195 | 1,57189E-07 | 9,60324 | 15,69656 |
| v_c | -3,19357 | 0,26135 | -12,21972 | 1,58115E-09 | -3,74759 | -2,63954 |
| f | -2,56209 | 0,16769 | -15,27865 | 5,79598E-11 | -2,91758 | -2,2066 |
| a_p | -0,7971 | 0,234 | -3,40639 | 0,00361 | -1,29316 | -0,30104 |

**Slika 5.53.** Zavisnosti normalne vjerojatnosti od vrijednosti ostataka za pokuse postojanosti alata

6. TROŠKOVNA ANALIZA PRIJELAZA NA ODRŽIVU STROJNU OBRADU METALA REZANJEM

6.1. Razrada ekonomskog modela

Kako bi se odredila primjenjivost hlađenja vrtložnom cijevi umjesto uporabe emulzije kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13, potrebno je pažljivo utvrditi sve nastale troškove. Klasični ekonomski modeli obrade rezanjem su mikroekonomski modeli temeljeni na Taylorovoj jednadžbi postojanosti alata u konvencionalnom obliku $T = T(v_c)$ odnosno proširenom obliku $T = T(v_c, f, a_p)$. Međutim, ovi modeli ne obuhvaćaju eksplicitno troškove povezane s uporabom SHIP-a odnosno rashladnog medija općenito. Stoga je klasični ekonomski model kojeg navodi Klocke [46] ovdje preuređen i dopunjen.

Komadno neproizvodno vrijeme t_n (nezavisno od parametara rezanja) opisuje izraz:

$$t_n = \frac{t_{pz}}{n_s} + t_{so} + t_p + \frac{L_{ph}}{v_{ph}} i_p, \quad (6.1)$$

gdje je t_{pz} ukupno vrijeme za pripremu alatnog stroja/radnog mjesta za obradu nekog komada i po završetku obrade dovođenje alatnog stroja/radnog mjesta u prvotno stanje (pojavljuje se jednom bez obzira da li se izrađuje jedan komad ili cijela serija), n_s veličina serije (planirani broj komada), t_{so} vrijeme potrebno za uzimanje, stezanje, otpuštanje i otpremanje radnog komada, t_p vrijeme pozicioniranja alata za obradu, L_{ph} duljina povratnog hoda alata nakon prolaza, v_{ph} programirana brzina povratnog hoda alata i i_p ukupni broj prolaza alata.

Glavno strojno vrijeme t_g , kada obradak poprima željena svojstva, za vanjsko uzdužno tokarenje s konstantnim parametrima rezanja iznosi:

$$t_g = \frac{L}{v_f} i_p = \frac{L}{f n} i_p = \frac{\pi D L}{v_c f} i_p, \quad (6.2)$$

gdje je L duljina prolaza alata koja sadrži duljinu za obradu l_p i duljine ulaznog l_u i izlaznog l_i hoda alata ($L = l_p + l_u + l_i$), v_f posmična brzina, f posmak po okretaju, n frekvencija vrtnje motorvretena, D promjer obratka na mjestu rezanja i v_c brzina rezanja.

Broj obrađenih komada po reznoj oštrici (tj. za vrijeme njezine postojanosti) z_T je:

$$z_T = \frac{T}{t_g}. \quad (6.3)$$

Komadno alatno vrijeme t_a je onda:

$$t_a = \frac{t_{a1}}{z_T} = t_g \cdot \frac{t_{a1}}{T}, \quad (6.4)$$

gdje je t_{a1} vrijeme zamjene rezne oštrice.

Jedinično proizvodno vrijeme t_1 je određeno izrazom:

$$t_1 = t_n + t_g + t_a. \quad (6.5)$$

Proizvodnost Q kao mjera tehničke sposobnosti obradnog sustava izražava se količinom obradaka obrađenih u danjoj operaciji i jedinici vremena pa je:

$$Q = \frac{1}{t_1}. \quad (6.6)$$

Operativna satnica alatnog stroja C_{ns} je vrlo važan element pri utvrđivanju ekonomičnosti obrade. Ona se može detaljno proračunati prema izrazu:

$$C_{ns} = \frac{C_{nsg}}{FRS} = \frac{1}{FRS} (OT + K + OS + OD + TRP + BD + IT), \quad (6.7)$$

gdje je C_{nsg} godišnji operativni trošak alatnog stroja, OT godišnji otpis (amortizacija), K godišnje kamate (anuitet), OS godišnje osiguranje, OD godišnje održavanje, TRP godišnji troškovi radnog prostora (najam, režije za struju, vodu i sl.), BD godišnji bruto osobni dohodak operatera, IT godišnji indirektni (opći) troškovi i FRS godišnji fond radnih sati.

Postoje različiti načini izračunavanja godišnjeg otpisa (amortizacije) OT . Najjednostavnija je linearna metoda amortizacije bez ostatka vrijednosti kod koje je nabavna cijena alatnog stroja C_{AS} podijeljena na broj godina njegovog korisnog vijeka n_g (za redovni otpis = 10 godina, za ubrzani otpis = 5 godina):

$$OT = \frac{C_{AS}}{n_g}. \quad (6.8)$$

Prema složenom kamatnom računu godišnji anuitet K iznosi:

$$K = C_{AS}(1+k)^{n_g} \frac{k}{(1+k)^{n_g} - 1}, \quad (6.9)$$

gdje je obično $k = 0,04 - 0,08$ (kamatna stopa 4 – 8 %).

Troškovi osiguranja OS izraženi na godinu su:

$$OS = C_{AS} \frac{n_g + 1}{2n_g} o, \quad (6.10)$$

gdje je obično $o = 0,015 - 0,03$ (stopa osiguranja 1,5 – 3 %).

Godišnji trošak za održavanje alatnog stroja OD je u početku uporabe manji, a pri kraju korisnog vijeka sve veći. Prosječna se vrijednost može utvrditi na 10 – 15 % nabavne cijene:

$$OD = (0,1 \dots 0,15) C_{AS}. \quad (6.11)$$

Godišnji indirektni (opći) troškovi IT obuhvaćaju posebne naknade, administrativne troškove, radnu opremu i sl., a utvrđuju se na 100 – 300 % bruto osobnog dohotka operatera BD , odnosno:

$$IT = (1 \dots 3) BD. \quad (6.12)$$

Godišnji fond radnih sati alatnog stroja FRS se procjenjuje prema izrazu:

$$FRS = h_D \eta D_T T_G, \quad (6.13)$$

gdje je h_D predviđeni broj radnih sati na dan, $\eta < 1$ djelotvornost obradnog sustava s obzirom na nepredvidive tehnološke zastoje i osobne potrebe operatera, D_T broj radnih dana tjedno i T_G broj radnih tjedana godišnje.

Razlikuju se dvije odnosne grupe troškova obrade: *fiksni* troškovi koji se u ukupnom iznosu ne mijenjaju promjenom parametara rezanja i *varijabilni* troškovi čiji se ukupni iznos mijenja promjenom parametara rezanja. Troškovi u nastavku koji nisu posebno navedeni kao fiksni se onda svrstavaju u grupu varijabilnih troškova.

Trošak komadnog neproizvodnog vremena C_n (fiksni trošak nezavisan od parametara rezanja) je proporcionalan vremenu t_n dok je trošak obrade C_o proporcionalan vremenu t_g odnosno:

$$C_n = C_{ns} t_n, \quad (6.14)$$

$$C_o = C_{ns} t_g. \quad (6.15)$$

Trošak alata C_a se računa zbrajanjem troška nabave alata dobivenog dijeljenjem nabavne cijene alata svedene na jednu reznu oštricu C_{a1} s brojem obrađenih komada istom z_T i troška zamjene rezne oštrice proporcionalnog vremenu t_a odnosno:

$$C_a = \frac{C_{a1}}{z_T} + C_{ns} t_a = \frac{t_g}{T} (C_{a1} + C_{ns} t_{a1}). \quad (6.16)$$

U gornjem izrazu nabavna cijena alata svedena na jednu reznu oštricu C_{a1} iznosi:

$$C_{a1} = \frac{C_{pl}}{z_{pl}} + \frac{C_d}{N_{pl}}, \quad (6.17)$$

gdje je C_{pl} nabavna cijena rezne pločice, z_{pl} broj reznih oštrica na pločici, C_d nabavna cijena držača rezne pločice i N_{pl} broj pritezanja reznih oštrica u radnom vijeku držača (obično 400 pritezanja).

Trošak energije alatnog stroja C_E se računa zbrajanjem troška energije u stanju pripravnosti (zamjena radnog komada i rezne oštrice) i troška energije potrebne za obradu:

$$C_E = c_{kWh} [P_{sp}(t_n + t_a) + P_{as}t_g], \quad (6.18)$$

gdje je c_{kWh} cijena kilovatsata i P_{sp} snaga alatnog stroja u pripravnosti. U gornjem izrazu angažirana snaga stroja za vrijeme rezanja P_{as} iznosi:

$$P_{as} = \frac{v_c f a_p k_s}{\eta_s}, \quad (6.19)$$

gdje je k_s specifična sila rezanja za materijal i $\eta_s = 0,7 - 0,85$ stupanj iskoristivosti u zavisnosti od frekvencije vrtnje motorvretena, načina prijenosa i starosti stroja.

Gledano s aspekta jednog alatnog stroja, uporaba emulzije kao rashladnog medija sa sobom donosi troškove nabave i zbrinjavanja s jedne strane i trošak distribucije s druge strane. S obzirom na godišnje troškove nabave i zbrinjavanja, trošak uporabe emulzije C_{EM} je proporcionalan vremenu t_g i može se prikazati izrazom:

$$C_{EM} = C_{nse} t_g, \quad (6.20)$$

gdje je C_{nse} operativna satnica uporabe emulzije. Treba navesti da je kod emulzije općenito cijena zbrinjavanja veća ili jednaka njezinoj nabavnoj cijeni i u specijaliziranim tvrtkama iznosi od 0,17 – 6,5 kn/l.

Trošak distribucije emulzije se odnosi na trošak energije pumpe C_{pumpa} odgovorne za njezino cirkuliranje:

$$C_{pumpa} = c_{kWh} P_p t_g, \quad (6.21)$$

gdje je P_p snaga pumpe za emulziju.

Dodatni troškovi uporabe emulzije odnose se na čišćenje obratka od emulzije C_{co} i čišćenje strugotine odmašćivanjem C_{cs} u svrhu pohrane ostataka emulzije i pripreme strugotine za prikupljanje i recikliranje. Navedeni troškovi se svrstavaju u grupu fiksnih troškova.

Uporaba vrtložne cijevi eliminira karakteristične troškove vezane uz uporabu emulzije: rashladni medij se ne kupuje, već proizvodi direktno u pogonu obrade (potrebna je samo energija kompresora kojeg obično ima svaki proizvodni pogon), nema troškova zbrinjavanja jer se koristi ohlađeni komprimirani zrak i nema troškova čišćenja obratka i strugotine. Ovdje je potrebno uzeti u obzir godišnje troškove otpisa i održavanja uređaja kao i trošak distribucije zraka.

S obzirom na godišnje troškove otpisa i održavanja, trošak uporabe vrtložne cijevi C_{VC} je proporcionalan vremenu t_g i iznosi:

$$C_{VC} = C_{nsv} t_g, \quad (6.22)$$

gdje je C_{nsv} operativna satnica uporabe vrtložne cijevi.

Trošak distribucije, odnosno trošak energije kompresora za zrak $C_{kompresor}$ je:

$$C_{kompresor} = c_{kWh} P_k t_g \frac{Q_v}{Q_{dk}}, \quad (6.23)$$

gdje je P_k snaga kompresora za zrak, Q_v protok zraka kroz vrtložnu cijev i Q_{dk} dobava zraka kompresorom.

Bez obzira na vrstu rashladnog medija, u troškovnu evaluaciju treba uključiti i trošak vezan za sabijanje strugotine (uključujući i usitnjavanje, ako je potrebno) C_{ss} koje se poduzima radi lakšeg transporta. Ovaj se trošak onda svrstava u grupu fiksnih troškova.

Model jediničnog proizvodnog troška za tokarenje uz hlađenje emulzijom $C_{1(EM)}$ se može formirati u sljedećem obliku:

$$C_{1(EM)} = (C_m + C_n + C_{co} + C_{cs} + C_{ss})_{\text{fiksni}} + (C_o + C_a + C_E + C_{pumpa} + C_{EM})_{\text{varijabilni}}, \quad (6.24)$$

gdje je C_m trošak materijala.

Slično, model jediničnog proizvodnog troška za tokarenje uz hlađenje vrtložnom cijevi $C_{1(VC)}$ ima oblik:

$$C_{1(VC)} = (C_m + C_n + C_{ss})_{\text{fiksni}} + (C_o + C_a + C_E + C_{kompresor} + C_{VC})_{\text{varijabilni}}. \quad (6.25)$$

6.2. Troškovna evaluacija obrade

U nastavku se iznosi primjer troškovne evaluacije tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 kako bi se pokazalo da hlađenje vrtložnom cijevi umjesto emulzijom može ponuditi ekonomično rješenje na putu prema održivoj obradi. S obzirom da je za korozijsku otpornost poželjna što niža hrapavost obrađene površine, a prema rezultatima u poglavlju 5.2.4 treba koristiti kombinaciju malog posmaka i veće dubine rezanja, za evaluaciju je odabran pokus broj 5 u tablici 5.10 sa sljedećim parametrima rezanja: $v_c = 170$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm. Također, postojanosti alata su određene prema izrazima (5.15) i (5.16).

U tablici 6.1 su navedeni opći ulazni podaci razvrstani prema kategorijama. Proračun operativne satnice alatnog stroja je prikazan u tablici 6.2. U obzir je uzeto 1968 sati rada stroja godišnje. Također, u tablicama 6.3 i 6.4. su prikazani proračuni operativnih satnica za uporabu emulzije odnosno vrtložne cijevi. Konačno, struktura jediničnog proizvodnog troška je prikazana u tablici 6.5.

Tablica 6.1. Opći ulazni podaci za troškovnu evaluaciju obrade po kategorijama

| | |
|--|--------|
| <i>Podaci za operativnu satnicu alatnog stroja osim (*):</i> | |
| Kamatna stopa k , 4 – 8 % | 6 |
| Stopa osiguranja o , 1,5 – 3 % | 2 |
| Postotak troškova održavanja prema kupovnoj cijeni, 10 – 15 % | 10 |
| Postotna procjena indirektnih (općih) troškova, 100 – 300 % | 200 |
| <i>Voda:</i> | |
| Cijena m^3 vode s PDV-om, kn/ m^3 | 20,08 |
| Fiksna mjesečna naknada za vodu s PDV-om, kn/mjeseč* | 19,19 |
| <i>Struja:</i> | |
| Cijena kWh s PDV-om c_{kWh} , kn/kWh | 0,58 |
| Cijena radne snage s PDV-om, kn/kW* | 14,50 |
| Fiksna mjesečna naknada za struju s PDV-om, kn/mjeseč* | 21,75 |
| <i>Zrak:</i> | |
| Protok zraka kroz vrtložnu cijev Q_v , l/min | 708 |
| Dobava zraka kompresorom Q_{dk} , l/min | 1210 |
| <i>Materijal i geometrija obratka:</i> | |
| Specifična sila rezanja za materijal k_s , N/ mm^2 | 2850 |
| Promjer obratka na mjestu rezanja D , mm | 80 |
| Duljina za obradu l_p , mm | 463 |
| <i>Snaga:</i> | |
| Instalirana snaga alatnog stroja P_s , kW* | 30,4 |
| Stupanj iskoristivosti alatnog stroja η_s , 0,7 – 0,85 | 0,8 |
| Snaga alatnog stroja u pripravnosti P_{sp} , kW | 0,5 |
| Snaga pumpe za emulziju P_p , kW* | 1 |
| Snaga kompresora za zrak P_k , kW* | 7,5 |
| <i>Alat:</i> | |
| Broj prolaza alata i_p | 1 |
| Sumirani ulazni i izlazni hod alata $l_u + l_i$, mm | 5 |
| Vrijeme zamjene rezne oštrice t_{a1} , min/oštrica | 0,5 |
| Nabavna cijena držača rezne pločice C_d , kn | 501,25 |
| Broj pritezanja reznih oštrica u radnom vijeku držača N_{pl} | 400 |
| Nabavna cijena rezne pločice C_{pl} , kn | 80,60 |
| Broj reznih oštrica na pločici z_{pl} | 4 |

Tablica 6.2. Operativna satnica alatnog stroja

| | |
|--|-----------|
| Nabavna cijena alatnog stroja C_{AS} , kn | 762817,85 |
| Broj godina otpisa alatnog stroja n_g , godina | 10 |
| Godišnji otpis (amortizacija) OT , kn | 76281,79 |
| Godišnje kamate (anuitet) K , kn | 103642,50 |
| Godišnje osiguranje OS , kn | 8391,00 |
| Godišnje održavanje OD , kn | 76281,79 |
| Godišnji troškovi radnog prostora TRP , kn | 1055,33 |
| Godišnji bruto osobni dohodak operatera BD , kn | 125307,24 |
| Godišnji indirektni (opći) troškovi IT , kn | 250614,48 |
| Godišnji operativni trošak alatnog stroja C_{nsg} , kn | 641574,12 |
| Godišnji fond radnih sati FRS , h | 1968 |
| <i>Operativna satnica alatnog stroja C_{ns}, kn/h</i> | 326,00 |

Tablica 6.3. Operativna satnica uporabe emulzije

| | |
|---|---------|
| Godišnja potrošnja koncentrata, l | 40 |
| Nabavna cijena koncentrata, kn/l | 49,90 |
| Postotni udio koncentrata u emulziji, % | 5 |
| Godišnja potrošnja vode, l | 760 |
| Nabavna cijena vode, kn/l | 0,02 |
| Godišnja potrošnja emulzije, l | 800 |
| Nabavna cijena emulzije, kn/l | 2,51 |
| Cijena zbrinjavanja emulzije, kn/l | 2,51 |
| Godišnji trošak koncentrata, kn | 1996,00 |
| Godišnji trošak vode, kn | 15,26 |
| Godišnji trošak zbrinjavanja emulzije, kn | 2008,00 |
| Godišnji operativni trošak uporabe emulzije, kn | 4019,26 |
| Godišnji fond radnih sati FRS , h | 1968 |
| <i>Operativna satnica uporabe emulzije C_{nse}, kn/h</i> | 2,04 |

Tablica 6.4. Operativna satnica uporabe vrtložne cijevi

| | |
|---|---------|
| Nabavna cijena vrtložne cijevi, kn | 3648,41 |
| Nabavna cijena dijelova za povezivanje, kn | 1118,9 |
| Nabavna cijena kompresora, kn (*pogon već posjeduje kompresor za zrak) | 0,00* |
| Broj godina otpisa | 5 |
| Godišnji otpis, kn | 953,46 |
| Godišnje održavanje, kn | 476,73 |
| Godišnji operativni trošak uporabe vrtložne cijevi, kn | 1430,19 |
| Godišnji fond radnih sati FRS , h | 1968 |
| <i>Operativna satnica uporabe vrtložne cijevi, C_{nsv}, kn/h</i> | 0,73 |

Tablica 6.5. Struktura jediničnog proizvodnog troška

| Kategorija | Emulzija | Vrtložna cijev |
|---|----------|----------------|
| Postojanost rezne oštrice alata T , min/oštrica | 1,83 | 2,51 |
| Komadno neproizvodno vrijeme t_n , min/komad (*izmjereno) | 4,60* | 3,85* |
| Glavno strojno vrijeme t_g , min/komad | 3,46 | 3,46 |
| Komadno alatno vrijeme t_a , min/komad | 0,94 | 0,69 |
| Jedinično proizvodno vrijeme t_1 , min/komad | 9,00 | 8,00 |
| Proizvodnost Q , komad/min | 0,11 | 0,13 |
| Broj obrađenih komada po reznoj oštrici z_T , komad/oštrica | 0,53 | 0,73 |
| Trošak materijala C_m , kn/komad | 487,78 | 487,78 |
| Trošak komadnog neproizvodnog vremena C_n , kn/komad | 24,99 | 20,92 |
| Trošak obrade C_o , kn/komad | 18,80 | 18,80 |
| Trošak alata C_a , kn/komad | 45,52 | 33,18 |
| Trošak energije alatnog stroja C_E , kn/komad | 0,061 | 0,056 |
| Trošak energije pumpe za emulziju C_{pumpa} , kn/komad | 0,03 | - |
| Trošak energije kompresora za zrak $C_{kompresor}$, kn/komad | - | 0,15 |
| Trošak uporabe emulzije C_{EM} , kn/komad | 0,12 | - |
| Trošak uporabe vrtložne cijevi C_{VC} , kn/komad | - | 0,04 |
| Trošak čišćenja obratka od emulzije C_{co} , kn/komad | 0,48 | - |
| Trošak čišćenja strugotine od emulzije C_{cs} , kn/komad | 0,11 | - |
| Trošak za sabijanje strugotine C_{ss} , kn/komad | 0,03 | 0,03 |
| <i>Jedinični proizvodni trošak C_1, kn/komad</i> | 577,92 | 560,95 |

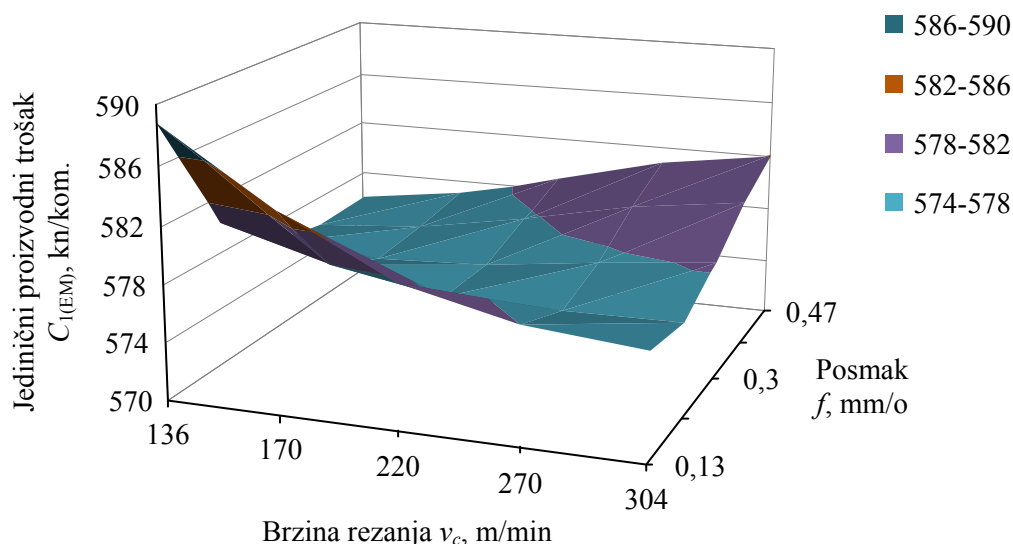
Tablica 6.5 pokazuje da se u promatranim uvjetima obrade uporabom vrtložne cijevi postiže 16,97 kuna manji jedinični proizvodni trošak u usporedbi s mokrom obradom. Također je vidljivo da postojanost alata i rashladni medij najviše utječu na jedinični proizvodni trošak.

S obzirom na postojanost alata, jedinični proizvodni trošak nije koreliran samo s glavnim vremenom obrade, već i s vremenom zamjene istrošene rezne oštrice. Za ispitivane parametre rezanja vrijeme zamjene rezne oštrice ima veći doprinos jediničnom proizvodnom trošku kod tokarenja uz hlađenje emulzijom. Stvarno vrijeme mijenjanja rezne oštrice nije veće, ali je broj promjena veći zbog njezinog bržeg trošenja. Posljedično, kod tokarenja uz hlađenje emulzijom je veći i trošak alata.

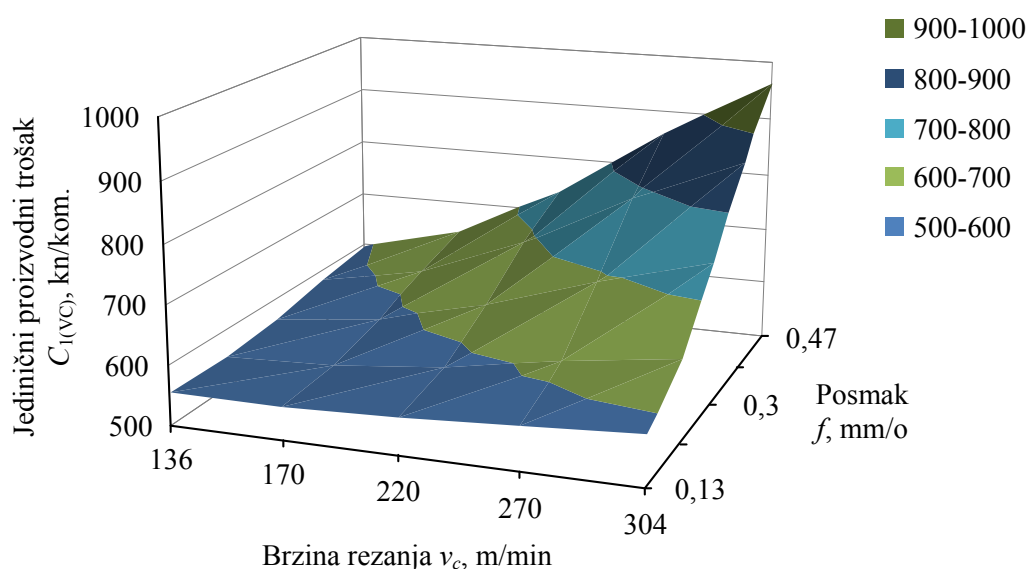
Komadno neproizvodno vrijeme je utvrđeno direktnim mjerenjem. Ono je nešto manje kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi jer nije potrebno brisanje obratka i dijelova alatnog stroja po završetku obrade (prije skidanja obratka). Također, količina proizvedene strugotine je jednaka u oba slučaja. To rezultira jednakim troškovima vezanim za sabijanje strugotine.

Na slikama 6.1 i 6.2 je grafički prikaz jediničnog proizvodnog troška kao funkcije brzine rezanja i posmaka za dubinu rezanja $a_p = 0,5$ mm. Kod hlađenja emulzijom je najbolje koristiti ili visoku brzinu rezanja i mali posmak ili nisku brzinu rezanja i veliki posmak. Ipak, drugo-navedena kombinacija parametara rezanja nije poželjna s aspekta površinske hrapavosti, odnosno korozijske otpornosti. Kod hlađenja vrtložnom cijevi svako povećanje brzine rezanja ili posmaka povećava jedinični proizvodni trošak. Utjecaj posmaka je jače izražen na visokim brzinama rezanja. Ovdje je s obzirom na jedinični proizvodni trošak i površinsku hrapavost (korozijsku otpornost) najbolje koristiti kombinaciju najniže brzine rezanja i najmanjeg posmaka.

Iz perspektive zaštite okoliša i zdravlja radnika poželjno je potpuno uklanjanje tekućina za obradu metala na osnovi ulja. Također, poželjna je i ekonomska korist. Za promatrani alatni stroj godišnja potrošnja emulzije iznosi 800 litara. Prevedeno samo u troškove nabave i zbrinjavanja to je ekvivalentno iznosu od 4.019,26 kuna na godišnjoj razini. S druge strane, jednokratni investicijski trošak u hlađenje ohlađenim zrakom iznosi 4.767,31 kuna: vrtložna cijev 3.648,41 kuna i regulator tlaka, filter, manometar i crijevo 1.118,90 kuna (pogon već posjeduje kompresor za zrak). Dakle, povrat investicije je moguć već nakon samo 14 mjeseci.



Slika 6.1. Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od brzine rezanja i posmaka kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje emulzijom (dubina rezanja $a_p = 0,5$ mm)



Slika 6.2. Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od brzine rezanja i posmaka kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje vrtložnom cijevi (dubina rezanja $a_p = 0,5$ mm)

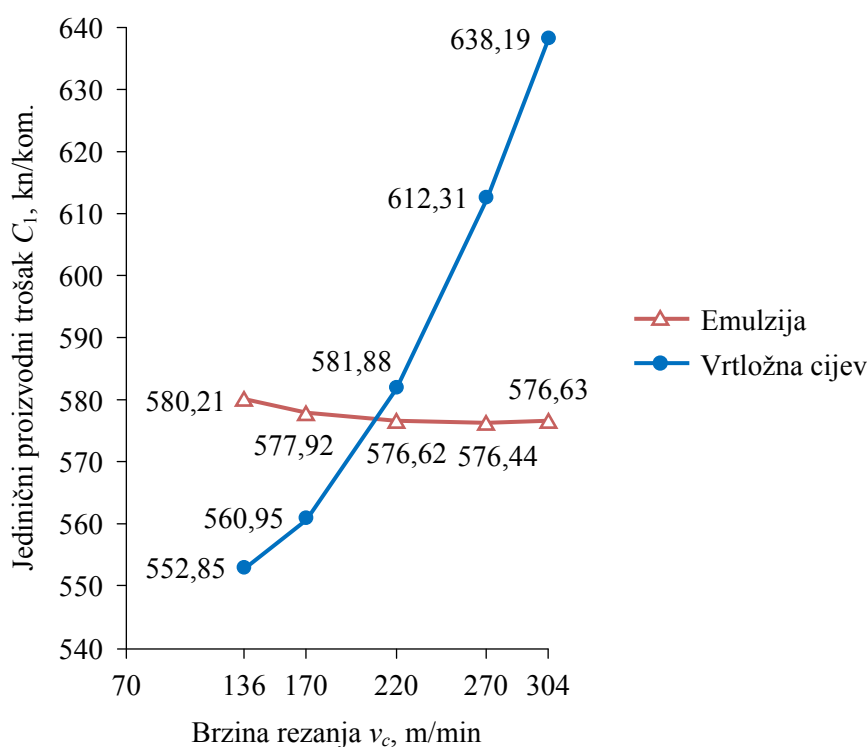
Kako bi se utvrdio doprinos rashladnog medija jediničnom proizvodnom trošku, formirana je tablica 6.6. Ovdje treba ukazati na 5 puta veći trošak distribucije rashladnog medija u slučaju uporabe vrtložne cijevi u odnosu na uporabu emulzije, ali je u konačnici hlađenje vrtložnom cijevi, tj. ohlađenim komprimiranim zrakom ipak isplativije.

Jedinični proizvodni trošak se može odrediti za različite brzine rezanja kao što je prikazano na slici 6.3. Hlađenje vrtložnom cijevi je isplativije do brzine rezanja od 209,68 m/min kada se

Tablica 6.6. Struktura troška uporabe rashladnog medija

| Kategorija | Emulzija | Vrtložna cijev |
|---|----------|----------------|
| Trošak nabave, kuna/komad | 0,06 | 0,03 |
| Trošak održavanja, kuna/komad | - | 0,01 |
| Trošak distribucije, kuna/komad | 0,03 | 0,15 |
| Trošak zbrinjavanja, kuna/komad | 0,06 | - |
| Trošak čišćenja obratka, kn/komad | 0,48 | - |
| Trošak čišćenja strugotine, kn/komad | 0,11 | - |
| <i>Trošak rashladnog medija, kuna/komad</i> | 0,74 | 0,19 |

postizhe jedinični proizvodni trošak od 576,76 kuna. To znači da nakon ove brzine rezanja hlađenje vrtložnom cijevi više ne može osigurati bolju postojanost alata u usporedbi s emulzijom odnosno da dolazi do ubrzanog trošenja alata i u konačnici njegovog otkazivanja. S druge je strane optimalna brzina rezanja kod hlađenja emulzijom 257,43 m/min uz jedinični proizvodni trošak od 576,42 kune. Ovo je pokazatelj da u promatranom rasponu brzina rezanja kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje vrtložnom cijevi treba koristiti kvalitetniji materijal reznih pločica u usporedbi s tokarenjem uz hlađenje emulzijom.



Slika 6.3. Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od brzine rezanja kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 (posmak $f = 0,2$ mm, dubina rezanja $a_p = 0,5$ mm)

7. ZAKLJUČAK

Danas se često spominje pojam održivog razvoja. Održivi razvoj predstavlja strategiju stalnog napretka, uz uporabu postojećih resursa na način da ne štetimo prirodnom okruženju, odnosno da na najbolji mogući način zadovoljimo svoje potrebe, ali da pri tome ne ugrozimo mogućnost da isto tako dobro, ili još bolje, svoje potrebe mogu zadovoljiti i naredne generacije.

Razvoj je neminovan u svim područjima ljudske djelatnosti pa tako i u proizvodnoj industriji. Poseban razvoj je prisutan u obradi metala rezanjem, gdje se zbog povećanja produktivnosti radi sa sve višim parametrima rezanja. To iziskuje uporabu specijalne tekućine – sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP), osobito kod obrade materijala niske toplinske vodljivosti kao što su nehrđajući čelici.

S obzirom da konvencionalni SHIP-ovi na osnovi mineralnih ulja (reznog ulja, emulzije i polusintetičke mikroemulzije) imaju negativni učinak na okoliš, zdravlje radnika i troškove proizvodnje, razvija se sve više alternativnih tehnika hlađenja i/ili podmazivanja. Ovdje je istražena alternativna tehnika hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi u obradi martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 postupkom tokarenja. Cilj je bio utvrditi utjecaj ove tehnike hlađenja na korozijsku otpornost obrađene površine i njezinu tehnološku i ekonomsku održivost u usporedbi s konvencionalnim hlađenjem emulzijom za obradu metala u svrhu postizanja ekološki prihvatljive obrade. Sukladno navedenom, testirana je radna hipoteza da se uvođenjem hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 može ukloniti ekološko, zdravstveno i ekonomsko opterećenje svojstveno konvencionalnom hlađenju emulzijom i postići održivost obrade bez žrtvovanja njezinog učinka.

U teorijskom dijelu istraživanja je utvrđeno da minimalna hrapavost obrađene površine nehrđajućeg čelika osigurava maksimalnu korozijsku otpornost i, posljedično, parametri rezanja i polumjer zaobljenja vrha alata kontroliraju korozijsku otpornost obrađenog dijela. Analiza uloge hrapavosti obrađene površine u koroziji nehrđajućih čelika je osobito zanimljiva jer je to parametar koji se može pratiti još u procesu obrade što je usvojeno u ovom istraživanju.

Ekperimentalni dio istraživanja predstavlja rezultate tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 u uvjetima konvencionalnog hlađenja emulzijom i hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi. Za obje tehnike hlađenja su korišteni identični elementi obradnog sustava i parametri rezanja (brzina, posmak i dubina), što je omogućilo usporedivost rezultata istraživanja. Izvedeno je devet pokusa s obzirom na korozijsku otpornost i četrdeset pokusa s obzirom na obradivost. Provedene su dvije vrste elektrokemijskih ispitivanja korozije: mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga radi stjecanja uvida o korozijskom ponašanju uzoraka obrađenih površina u ispitnom elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina natrijevog klorida temperature 25 °C) i potenciodinamička polarizacijska mjerenja kako bi se odredile njihove trenutne brzine korozije. Prosječne brzine korozije utvrđene su gravimetrijskim ispitivanjima. U svrhu dobivanja uvida u stanje i kemijski sastav površina uzoraka, prije i nakon ispitivanja korozijske otpornosti primijenjena je pretražna/skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) u kombinaciji s energijski razlučujućom/disperzivnom rendgenskom spektroskopijom (EDS). Ispitivanje obradivosti (hrapavost obrađene površine i postojanost alata) je provedeno prema okretljivom centralnom kompozitnom planu pokusa (CCD). Da bi se izbjegle moguće pogreške zbog operacije otpuštanja i ponovnog stezanja obratka, hrapavost je mjerena na obratku izravno u tokarilici. Višestrukom regresijskom analizom rezultata pokusa su dobiveni polinomski matematički modeli koji predstavljaju sliku složenih odnosa između hrapavosti obrađene površine i parametara rezanja. Postojanost alata je određena neizravnim putem pomoću dobivenih krivulja trošenja. Krivulje trošenja alata su formirane na osnovi rezultata mjerenja istrošenosti njegove stražnje površine koje se obavljalo na svakih pola ili nakon svake trećine prolaza. Za kriterij istrošenosti stražnje površine alata od 0,5 mm su višestrukom regresijskom analizom određene proširene Taylorove jednadžbe postojanosti alata. Statistička obrada eksperimentalnih rezultata i dobiveni matematički modeli hrapavosti i postojanosti alata su omogućili izvođenje zaključaka o tehnološkoj učinkovitosti ispitivanih tehnika hlađenja. Troškovna analiza je omogućila izvođenje zaključaka o ekonomskoj opravdanosti implementacije hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi u proces obrade ispitnog materijala postupkom tokarenja.

U nastavku su sažeti rezultati istraživanja:

- Postoji jasan dokaz o učinku tehnike hlađenja i hrapavosti obrađene površine na korozijsku otpornost uzoraka ispitnog materijala X20Cr13 kroz varijaciju potencijala. Uzorak materijala tokarenog uz hlađenje emulzijom je imao manju površinsku

hrapavost i stoga veću vrijednost potencijala otvorenog strujnog kruga, a time i bolju korozijsku otpornost u odnosu na uzorak materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi. Međutim, nakon kratke početne stabilnosti pripadajuća krivulja potencijala kod otvorenog strujnog kruga je imala tendenciju izraženog pada zbog "razbijanja" zaštitnog filma emulzije prisutnog prije ulaza alata u zahvat. Uzorak materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi je bio specifičan po tome što je prvo pokazao blagi pad pripadajuće krivulje potencijala kod otvorenog strujnog kruga, a zatim, nakon nekog vremena, tendenciju njezinog rasta. Dakle, krivulja je ukazala na fenomen depasivacije-pasivacije. Na površini uzorka se pojavilo odgođeno spontano stvaranje i postupno debljanje pasivnog oksidnog filma (tj. zaštitnog sloja) pa je njegova korozijska otpornost vremenom rasla. Prema tome, može se zaključiti da se obrađena površina ispitnog materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi dugoročno bolje odupire korozijskom djelovanju.

- Gravimetrijska mjerenja su potvrdila vezu između hrapavosti obrađene površine i korozijske otpornosti odnosno manja hrapavost je rezultirala nižom brzinom korozije. Međutim, gravimetrijska brzina korozije uzorka materijala tokarenog uz hlađenje emulzijom je bila 5,76 puta veća od elektrokemijske dok je gravimetrijska brzina korozije uzorka materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi bila samo 2,78 puta veća od elektrokemijske. To je u skladu s rezultatima mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga i dovodi do važnog zaključka da tehnika hlađenja vrtložnom cijevi pri tokarenju ispitnog materijala X20Cr13 ima dugoročno povoljan učinak na korozijsku otpornost.
- Za korozijsku otpornost je poželjan što viši sadržaj kroma (Cr) i što niži sadržaj ugljika (C) u materijalu. Također je važan i što viši sadržaj kisika (O) koji s kromom tvori pasivni film i pomaže njegovom samo-obnavljanju nakon obrade rezanjem. U usporedbi s uzorkom materijala tokarenog uz hlađenje emulzijom, uzorak materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi je imao viši sadržaj Cr, nešto niži sadržaj O i znatno niži sadržaj C. Prema tome, rezultati SEM/EDS analize navode na zaključak da hlađenje vrtložnom cijevi u usporedbi s hlađenjem emulzijom pri tokarenju ispitnog materijala X20Cr13 ne pogoršava (smanjuje) njegovu korozijsku otpornost.

- Na temelju statističkih testova (F -test i Studentov t -test) je zaključeno da tehnike hlađenja (emulzija odnosno vrtložna cijev) ne utječu značajno na hrapavost obrađene površine ispitnog materijala X20Cr13 i time na korozijsku otpornost. Međutim, u 70 % provedenih pokusa je srednje aritmetičko odstupanje profila Ra bilo manje kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi što je pokazatelj bolje korozijske otpornosti. Također, značajno niže vrijednosti Ra kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi u odnosu na tokarenje uz hlađenje emulzijom su bile postignute pri malim posmacima u kombinaciji s malim ili srednjim dubinama rezanja.
- S obzirom na tokarenje uz hlađenje emulzijom, višestrukom regresijskom analizom je utvrđeno da hrapavost obrađene površine ovisi o posmaku, dubini rezanja i interakciji posmaka i dubine rezanja pri čemu se najmanja hrapavost postiže uz kombinaciju najmanjeg posmaka i najveće dubine rezanja. S obzirom na tokarenje uz hlađenje vrtložnom cijevi, višestrukom regresijskom analizom je utvrđeno da hrapavost obrađene površine ovisi samo o posmaku (linearni i kvadratni utjecaj) pri čemu se najmanja hrapavost postiže uz najmanji posmak.
- Zanimljivo je opažanje da je na polovici prolaza u čak osamnaest od dvadeset pokusa bilo veće trošenje alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi, da bi nakon toga u četrnaest od tih osamnaest pokusa nagib odnosnog pravca trošenja alata bio manji od nagiba pravca trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje emulzijom. Ovo navodi na zaključak da se alat kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi usporedbeno sporije troši. Vjerojatni razlog je što se polijevanje obratka i alata emulzijom uključuje prije ulaza alata u zahvat pa se na početku tokarenja formira granični podmazujući film. Kada zbog velikog specifičnog pritiska i temperature u zoni rezanja podmazivanje izgubi svoju učinkovitost, emulzija više ne može osigurati dovoljno brzo odvođenje topline u slučaju ispitnog materijala X20Cr13 koji ima nisku toplinsku vodljivost i alat se onda brže troši. Dakle, komprimirani zrak ohlađen na -10 °C je u ovim pokusima bolje obavio funkciju hlađenja.
- Određene su proširene Taylorove jednadžbe postojanosti alata za tokarenje ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje emulzijom odnosno vrtložnom cijevi. U usporedbi s tokarenjem uz hlađenje emulzijom, kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi je

postojanost alata više osjetljiva na promjenu brzine rezanja i posmaka, a manje osjetljiva na promjenu dubine rezanja.

- Uočeno je da klasični ekonomski modeli obrade rezanjem ne obuhvaćaju eksplicitno troškove povezane s uporabom SHIP-a odnosno rashladnog fluida općenito. Stoga je razvijen izvorni proračun jediničnog proizvodnog troška za slučaj hlađenja emulzijom i slučaj hlađenja vrtložnom cijevi.
- Kod hlađenja emulzijom je najbolje koristiti ili visoku brzinu rezanja i mali posmak ili nisku brzinu rezanja i veliki posmak. Ipak, drugo-navedena kombinacija parametara rezanja nije poželjna s aspekta površinske hrapavosti, odnosno korozijske otpornosti. Kod hlađenja vrtložnom cijevi svako povećanje brzine rezanja ili posmaka povećava jedinični proizvodni trošak. Utjecaj posmaka je jače izražen na visokim brzinama rezanja. Ovdje je s obzirom na jedinični proizvodni trošak i površinsku hrapavost odnosno korozijsku otpornost najbolje koristiti kombinaciju najniže brzine rezanja i najmanjeg posmaka.
- Hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi je ocijenjeno u smislu jediničnog proizvodnog troška, pokrivajući sve mjere održivosti. Na primjeru troškovne evaluacije tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje emulzijom i uz hlađenje vrtložnom cijevi je pokazano da uklanjanje emulzije i posljedično smanjenje troškova povezanih s nabavom, zbrinjavanjem i čišćenjem obratka i strugotine smanjuju jedinični proizvodni trošak. Bez obzira što u promatranom rasponu brzina rezanja kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi treba koristiti kvalitetniji materijal reznih pločica te da je trošak distribucije rashladnog fluida 5 puta veći, u konačnici je ova tehnika hlađenja ipak isplativija. To navodi na zaključak da osim ekoloških i zdravstvenih koristi hlađenje vrtložnom cijevi može očigledno ponuditi i značajnu ekonomsku korist.

Iz navedenih se rezultata istraživanja može zaključiti da je postavljena radna hipoteza u potpunosti potvrđena pa se za tokarenje martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 umjesto hlađenja emulzijom preporučuje hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi.

Na temelju izloženog proizlaze sljedeći znanstveni doprinosi:

- Provedba velikog broja pokusa omogućila je razmatranje nedovoljno istražene tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. Definirane su osnovne zakonitosti, analizirane karakteristične pojave te utvrđene prednosti i moguća ograničenja same tehnike hlađenja.
- Komparativni pristup u istraživanju je omogućio valorizaciju učinkovitosti tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi u odnosu na hlađenje emulzijom kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 s obzirom na sva tri segmenta održivog razvoja – ekološki, sociološki i ekonomski.
- Rezultati usporedbe utjecaja tehnika hlađenja emulzijom i vrtložnom cijevi kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 su pružili saznanja o korozijskoj otpornosti obrađene površine odnosno njezinoj hrapavosti kao i o trošenju i postojanosti alata koja do sada nisu zabilježena u literaturi. Od osobitog je značaja saznanje da se obrađena površina ispitnog materijala tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi dugoročno bolje odupire korozijskom djelovanju od one dobivene tokarenjem uz hlađenje emulzijom.
- Detaljna analiza ekonomike obrade rezanjem izvornim modelom je potvrdila održivost tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 u uvjetima hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi, što predstavlja poseban doprinos u području strojne obrade nehrđajućih čelika.

Rezultati dobiveni provedenim istraživanjem svoju bi primjenu trebali pronaći u:

- proizvodnoj praksi što im daje osobitu vrijednost
- području planiranja i optimiranja održivog procesa obrade
- istraživanjima i razvoju održivog procesa obrade.

Prijedlozi za buduća istraživanja:

- Rezultati ekonomske analize upućuju na osjetno više troškove energije u slučaju hlađenja vrtložnom cijevi u odnosu na hlađenje emulzijom. Ovaj podatak zahtjeva potragu za mogućnostima optimiranja energetske učinkovitosti postojećeg sustava odgovornog za dobavu ohlađenog komprimiranog zraka. Moguća rješenja su zamjena postojećeg kompresora onim većeg kapaciteta dobave zraka ili postavljanje spremnika zraka velikog volumena, primjerice 1000 l ili više. Time bi se osigurala dostava iste količine zraka, ali uz manju potrošnju energije zbog manje učestalosti uključivanja kompresora.
- Usporedba dvije tehnike hlađenja kod tokarenja martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 (emulzija i vrtložna cijev) je pokazala prednosti i nedostatke jedne u odnosu na drugu. Buduća istraživanja bi se mogla usmjeriti na karakteristike i mogućnosti tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi kod tokarenja ostalih vrsta nehrđajućih čelika uz variranje količine, temperature i brzine strujanja zraka te utjecaja istih na korozijsku otpornost, hrapavost obrađene površine, trošenje alata i sl.
- Za buduća se istraživanja može razmotriti mogućnost povećanja učinkovitosti tehnike hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom uporabom vrtložne cijevi kroz uključivanje minimalne količine sredstva za podmazivanje koje bi se fino raspršilo unutar struje hladnog zraka. Na ovaj bi se način osim funkcija hlađenja i ispiranja omogućila i funkcija podmazivanja. Za očekivati je vrlo mali negativni utjecaj na održivost promatranog postupka obrade rezanjem s obzirom na ekstremno male količine korištenog sredstva za podmazivanje.

LITERATURA

- [1] Acharyya, S., Khandelwal, A., Kain, V., Kumar, A., Samajdar, I.: *Surface working of 304L stainless steel: Impact on microstructure, electrochemical behaviour and SCC resistance*. Materials Characterization 72, pp. 68-76, 2012.
- [2] Alar, V.: *Kemijska postojanost metala*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] Astakhov, V.P.: *Tribology of metal cutting*. Tribology and Interface Engineering Series, No. 52, Briscoe, B.J. (ur.), Elsevier Ltd, UK, 2006.
- [4] Astakhov, V.P.: *Ecological machining: near-dry machining*. Machining: Fundamentals and Recent Advances, Davim, J.P. (ur.), Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [5] ASTM G102-89: *Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1999.
- [6] ASTM G46-94: *Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- [7] ASTM G1-03: *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [8] Benedicto, E., Carou, D., Rubio, E.M.: *Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes*. Procedia Engineering 184, pp. 99-116, 2017.
- [9] Bierma T.J., Waterstraat F.L.: *Total cost of ownership for metalworking fluids*. Report of Illinois Waste Management and Research Center, Illinois State University, USA, 2004.
- [10] Boniardi, M.V., Casaroli, A.: *Stainless steels*. Lucefin S.p.A., Esine (Brescia), Italy, 2014.
- [11] Boothroyd, G., Knight, W.A.: *Fundamentals of machining and machine tools (2nd edition)*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1989.
- [12] Bordinassi, E.C., Stipkovic, M.F., Batalha, G.F., Delijaicov, S., de Lima N.B.: *Superficial integrity analysis in a super duplex stainless steel after turning*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 18 (1-2), pp. 335-338, 2006.
- [13] Boswell, B.: *Use of air-cooling and its effectiveness in dry machining processes*. PhD Thesis, Curtin University, Australia, 2008.

- [14] Box, G., Wilson, K. B.: *On the experimental attainment of optimum conditions*. Journal of Royal Statistical Society, Series B 13, pp. 1-38, 1951.
- [15] Braham, C., Ben Rhouma, A., Lédion, J., Sidhom, H.: *Effect of machining conditions on residual stress corrosion cracking of 316L SS*. Materials Science Forum 490–491, pp. 305-310, 2005.
- [16] Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A.G., Herrmann, C.: *Metalworking fluids – Mechanisms and performance*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 64 (2), pp. 605-628, 2015.
- [17] BSSA: *General principles of machining stainless steels*. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=192> (pristupljeno 17. 11. 2017.)
- [18] Bueno, M.J., Borges, D.B.V, Mansur, F.A., Schwartzman, M.M.M.A.: *Analysis of pitting corrosion in super martensitic stainless steel with different surface roughness in seawater*. 22° CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, Brasil, pp. 6640-6651, 2016.
- [19] Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B.: *Advancing cutting technology*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 52 (2), pp. 483-507, 2003.
- [20] Celent, L.: *Implementacija hlađenja komprimiranim hladnim zrakom korištenjem vrtložne cijevi u postupku glodanja*. Doktorski rad, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, 2014.
- [21] Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y.: *Metal machining: theory and applications*. Arnold, London, GB, 2000.
- [22] De Oliveira Jr., C.A., Diniz, A.E., Bertazolli, R.: *Correlating tool wear, surface roughness and a corrosion resistance in the turning process of super duplex stainless steel*. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 36 (4), pp. 775-785, 2014.
- [23] De Vos, P., Ståhl, J.-E.: *Applied metal cutting physics – best practices*. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden, 2016.
- [24] DIN 51385:2013: *Lubricants – Processing fluids or forming and machining of materials – Terms*.
- [25] *Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&rid=1> (pristupljeno: 20. 11. 2018.)

- [26] Dixit, U.S., Sarma, D.K., Davim, J.P.: *Environmentally friendly machining*. Springer, New York, USA, 2012.
- [27] Ekinović, S.: *Obrada rezanjem*. Dom štampe, Zenica, 2001.
- [28] Ekinović, S., Prčanović, H., Begović, E.: *Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3*. *Procedia Engineering* 132, pp. 608-614, 2015.
- [29] EN 10088-1:2014 (CEN): *Stainless steels – Part 1: List of stainless steels*.
- [30] Filetin, T.: *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
- [31] Ginting, Y.R., Boswell, B., Biswas, W.K., Islam, M.N.: *Investigation into alternative cooling methods for achieving environmentally friendly machining process*. *Procedia CIRP* 29, pp. 645-650, 2015.
- [32] Ginting, Y.R., Boswell, B., Biswas, W.K., Islam, M.N.: *Environmental generation of cold air for machining*. *Procedia CIRP* 40, pp. 648-652, 2016.
- [33] Gravalos, M.T., Martins, M., Diniz, A.E., Mei, P.R.: *Influence of roughness on the pitting corrosion resistance of turned superaustenitic stainless steel*. *Revista Escola de Minas* 63, pp. 77-82, 2010.
- [34] Grzesik, W., Kruszynski, B., Ruszaj, A.: *Surface integrity of machined surfaces*. *Surface Integrity in Machining*, Davim, J.P. (ur.), Springer-Verlag London Limited, 2010.
- [35] Hassiotis, N., Petropoulos, G., Hatzopoulos, C., Vaxevanidis, N.: *Influence of surface topography on corrosion of stainless steel AISI 304 turned surfaces with different cutting conditions*. *Advanced Materials Research* 18, pp. 399-405, 2007.
- [36] Hong, S.Y., Zhao, Z.: *Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining*. *Clean Technologies and Environmental Policy* 1 (2), pp. 107-116, 1999.
- [37] HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010: *Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) -- Tekstura površine: Metoda snimanja profila -- Nazivlje, definicije i parametri teksture površine – Amandman 1: Broj izbrojenih izbočina (ISO 4287:1997/Amd 1:2009; EN ISO 4287:1998/A1:2009)*. Hrvatski normativni dokument.
- [38] HRN EN ISO 8044:2015: *Korozija i zaštita metala i legura – Osnovni nazivi i definicije*. Hrvatski normativni dokument.
- [39] ISO 6743-7:1986(E): *Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Classification – Part 7: Family M (Metalworking)*. International Organization for Standardization, Geneva.

- [40] ISO 3685:1993(E): *Tool-life testing with single-point turning tools*. International Organization for Standardization, Geneva.
- [41] Jang, D.Y., Watkins, T.R., Kozaczek, K.J., Hubbard, C.R., Cavin, O.B.: *Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel*. *Wear* 194, pp. 168-173, 1996.
- [42] Juraga, I., Alar, V., Stojanović, I.: *Korozija i zaštita premazima*, FSB, Zagreb, 2014.
- [43] Kaladhar, M., Venkata Subbaiah, K., Srinivasa Rao, C.H.: *Machining of austenitic stainless steels – a review*. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 12 (1/2), pp. 178-192, 2012.
- [44] Kalpakjian, S., Schmid, S.R.: *Manufacturing engineering and technology*, 4th ed. Prentice-Hall, USA, 2001.
- [45] Kalyan Kumar, K.V.B.S., Choudhury, S.K.: *Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments*. *Journal of Materials Processing Technology* 203 (1-3), pp. 95-101, 2008.
- [46] Klocke, F.: *Manufacturing Processes I – Cutting*. Translated by Aaron Kuchle, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011.
- [47] Koshy, R.A.: *Thermally activated self-lubricating nanostructured coating for cutting tool applications*. PhD Thesis, Northwestern University Evanston, Illinois, USA, 2008.
- [48] Kostadin, T., Cukor, G.: *An overview of the development and use of coolant and lubricant systems in machining*. *Zbornik radova CIM 2015*, Hrvatska udruga proizvodnog strojarstva, Zagreb, pp. 153-160, 2015.
- [49] Kostadin, T.: *Čelici i željezni ljevovi – Materijali II*. Interna skripta, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [50] Kuljanić, E.: *Površinska obradba metala odvajanjem čestica*. *Tehnička enciklopedija* 11, pp. 1-29, 1988.
- [51] Lawal, S.A.: *A review of application of vegetable oil-based cutting fluids in machining non-ferrous metals*. *Indian Journal of Science and Technology* 6 (1), pp. 3951-3956, 2013.
- [52] Lee, S.M., Lee, W.G., Kim, Y.H., Jang, H.: *Surface roughness and the corrosion resistance of 21Cr ferritic stainless steel*. *Corrosion Science* 63, pp. 404-409, 2012.
- [53] Leppert, T., Peng, R.L.: *Residual stresses in surface layer after dry and MQL turning of AISI 316L steel*. *Production Engineering Research and Development* 6 (4-5), pp. 367-374, 2012.

- [54] Liu, J., Chou, Y.K.: *On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (3-4), pp. 635-645, 2007.
- [55] Liu, N.M., Chiang, K.T., Hung, C.M.: *Modeling and analyzing the effects of air-cooled turning on the machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy using the cold air gun coolant system*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 67, pp. 1053-1066, 2013.
- [56] Lucefin Gruppo: *Machinability ratings for stainless steels*. http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/gl_lavorabilita%CC%80inoxeng.pdf (pristupljeno 5. 3. 2017.)
- [57] Merchant, M.E.: *Basic mechanics of the metal cutting process*. Journal of Applied Mechanics 11, pp. A168-A175, 1944.
- [58] M'Saoubi, R., Outeiro, J.C., Changeux, B., Lebrun, J.L., Morão Dias, A.: *Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels*. Journal of Materials Processing Technology 96, pp. 225-233, 1999.
- [59] Nasr, M.N.A., Ng, E.G., Elbestawi, M.A.: *Modelling the effects of tool-edge radius on residual stresses when orthogonal cutting AISI 316L*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, pp. 401-411, 2007.
- [60] Northcott, W.H.: *A treatise on lathes and turning: simple, mechanical and ornamental*. London: Longmans, Green, UK, 1868.
- [61] Outeiro, J.C., Umbrello, D., M'Saoubi, R.: *Experimental and numerical modeling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, pp. 1786-1794, 2006.
- [62] Outokumpu: *Handbook of stainless steel*. Outokumpu Oyj, Espoo, Finland, 2013.
- [63] Oxley, P.L.B.: *Mechanics of metal cutting for a material of variable flow stress*. Journal of Engineering for Industry 85, pp. 339-345, 1963.
- [64] Pavić, A.: *Tehnologija – Obrada odvajanjem čestica*. Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [65] Pomenić, L.: *Skripta za predavanja iz kolegija Zaštita materijala*. Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2010.
- [66] Popov, N.: *Corrosion engineering: principles and solved problems, 1st ed.* Elsevier, 2015.
- [67] Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., Kopac, J.: *Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies*. Journal of Cleaner Production 18 (12), pp. 1211-1221, 2010.

- [68] Rashad, R., Amer, A.E., Shash, A.Y., Shendy, H.: *Effect of alloying elements on corrosion, microstructure and mechanical properties for casted free-nickel duplex stainless steels*. Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design, Öchner, A. & Altenbach, H. (ur.), Advanced Structured Materials 70, Springer, pp. 1-11, 2015.
- [69] Rech, J., Hamdi, H., Valette, S.: *Workpiece surface integrity*. Machining: Fundamentals and Recent Advances, Davim, J.P. (ur.), Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [70] Rede, V.: *Nehrđajući čelici*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [71] Sandvik Coromant: *Modern metal cutting: a practical handbook*. Sandviken, Sweden, 1994.
- [72] Sandvik Coromant: *The metal cutting technology technical guide*. Sandviken, Sweden, 2010.
- [73] Schwarz, M., Dado, M., Hnilica, R., Veverková, D.: *Environmental and health aspects of metalworking fluid use*. Polish Journal of Environmental Studies 24 (1), pp. 37-45, 2015.
- [74] Sharland, S.M.: *A review of the theoretical modelling of crevice and pitting corrosion*. Corrosion Science 27 (3), pp. 289-323, 1987.
- [75] Shaw, M.C.: *Metal cutting principles*. Oxford University Press, New York, USA, 1997.
- [76] Sun, S., Brandt, M., Dargusch, M.: *Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 50 (11), pp. 933-942, 2010.
- [77] Tafel, J.: *Über die Polarisation bei kathodischer Wasserstoffentwicklung*. Zeitschrift für Physicalische Chemie 50, pp. 641-712, 1905.
- [78] Takakuwa, O., Soyama, H.: *Effect of residual stress on the corrosion behaviour of austenitic stainless steel*. Advances in Chemical Engineering and Science 5, pp. 62-71, 2015.
- [79] Taylor, F.W.: *On the art of cutting metals*. ASME, 1906.
- [80] Turnbull, A., Mingard, K., Lord, J., Roebuck, B., Tice, D., Mottershead, K., Fairweather, N., Bradbury, A.: *Sensitivity of stress corrosion cracking of stainless steel to surface machining and grinding procedure*. Corrosion Science 53, pp. 3398-3415, 2011.
- [81] Ukrainczyk, M.: *Planiranje pokusa u industriji*. Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam 5 (3-4), pp. 96-105, 2010.

- [82] UKLA: *Good practice guide for safe handling and disposal of metalworking fluids*. United Kingdom Lubricants Association, 2018.
- [83] Veldhuis, S.C., Fox-Rabinovich, G.S., Shuster, L.S.: *Coolants and lubricants in metal cutting*. Handbook of Lubrication and Tribology, Volume I: Application and Maintenance, 2nd edition, Totten, G.E. (ur.), CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2006.
- [84] Vieregge, G.: *Zerspanung der Eisenwerkstoffe*. Stahleisen-Bücher 16, Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1959.
- [85] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi, T.: *Dry machining and minimum quantity lubrication*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 53 (2), pp. 511-537, 2004.
- [86] Yang, L. (ur.): *Techniques for corrosion monitoring*. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2008.
- [87] Young, P., Byrne, G., Cotterell, M.: *Manufacturing and the environment*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 13 (7), pp. 488-493, 1997.
- [88] Youssef, H.A., El-Hofy, H.: *Machining technology: machine tools and operations*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2008.
- [89] Zhang, S., Li, J.F., Wang, Y.W.: *Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions*. Journal of Cleaner Production 32, pp. 81-87, 2012.
- [90] ZH 1/467: Arbeitsgemeinschaft der Metallberufsgenossenschaften, 1999.
- [91] Zhang, X.G.: *Corrosion and electrochemistry of zinc*. Springer, USA, 1996.
- [92] 2000/532/EZ: Odluka Komisije od 3. svibnja 2000. koja zamjenjuje Odluku 94/3/EZ o popisu otpada u skladu s člankom 1. točkom (a) Direktive Vijeća 75/442/EEZ o otpadu i Odluku Vijeća 94/904/EZ o utvrđivanju popisa opasnog otpada u skladu s člankom 1. stavkom 4. Direktive Vijeća 91/689/EEZ o opasnom otpadu (priopćena pod brojem dokumenta C(2000) 1147). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000D0532&rid=9> (pristupljeno: 20. 11. 2018.)

POPIS OZNAKA I KRATICA

| | |
|-----------------|--|
| A_s | površina uzorka, cm^2 |
| A_5 | izduženje, % |
| a_a | odsječak na ordinati anodnog Tafelovog pravca |
| a_k | odsječak na ordinati katodnog Tafelovog pravca |
| a_p | dubina rezanja, mm |
| BD | godišnji bruto osobni dohodak operatera, kn |
| b_a | koeficijent smjera (nagib) anodnog Tafelovog pravca |
| b_k | koeficijent smjera (nagib) katodnog Tafelovog pravca |
| C_{AS} | nabavna cijena alatnog stroja, kn |
| C_a | trošak alata po obrađenom komadu, kn |
| C_{a1} | nabavna cijena alata svedena na jednu reznu oštricu, kn |
| C_{co} | trošak čišćenja obratka od emulzije, kn |
| C_{cs} | trošak čišćenja strugotine od emulzije, kn |
| C_d | nabavna cijena držača rezne pločice, kn |
| C_E | trošak energije alatnog stroja po obrađenom komadu, kn |
| C_{EM} | trošak uporabe emulzije po obrađenom komadu, kn |
| $C_{kompresor}$ | trošak energije kompresora za zrak po obrađenom komadu, kn |
| C_m | trošak materijala, kn |
| C_n | trošak komadnog neproizvodnog vremena, kn |
| C_{ns} | operativna satnica alatnog stroja, kn h^{-1} |
| C_{nse} | operativna satnica uporabe emulzije, kn h^{-1} |
| C_{nsg} | godišnji operativni trošak alatnog stroja, kn |
| C_{nsv} | operativna satnica uporabe vrtložne cijevi, kn h^{-1} |
| C_o | trošak obrade po komadu, kn |
| C_{pl} | nabavna cijena rezne pločice, kn |
| C_{pumpa} | trošak energije pumpe za emulziju po obrađenom komadu, kn |
| C_{ss} | trošak za sabijanje strugotine, kn |
| C_T | Taylorova konstanta, min |
| C_{VC} | trošak uporabe vrtložne cijevi po obrađenom komadu, kn |
| C_v | Taylorova konstanta, m min^{-1} |
| C_1 | jedinični proizvodni trošak, kn |

| | |
|----------------|--|
| c_{kWh} | cijena kilovatsata, kn kWh ⁻¹ |
| D | promjer obratka na mjestu rezanja, mm |
| D_T | broj radnih dana tjedno |
| df | stupanj slobode |
| E | potencijal, V |
| E_{kor} | korozijski potencijal, V |
| E_{ok} | potencijal otvorenog strujnog kruga, V |
| E_W | ekvivalentna masa ispitnog materijala, g |
| e | Eulerov broj = 2,718282... |
| F | Faradayova konstanta = 96487 C mol ⁻¹ ili varijabla Fischerove razdiobe |
| F_a | aktivna sila, N |
| F_c | tangencijalna (glavna) sila, N |
| F_f | aksijalna (posmična) sila, N |
| F_p | radijalna (pasivna) sila, N |
| FRS | godišnji fond radnih sati |
| F_{sh} | sila smicanja, N |
| F_{shN} | normalna sila na površinu smicanja, N |
| F_t | odrivna sila, N |
| F_γ | sila trenja na površini kontakta strugotine i alata, N |
| $F_{\gamma N}$ | normalna sila na površinu kontakta strugotine i alata, N |
| f | posmak po okretaju obratka, mm |
| h | debljina neodrezane strugotine, mm |
| h_D | predviđeni broj radnih sati na dan |
| h_1 | debljina skinute strugotine, mm |
| IT | godišnji indirektni (opći) troškovi, kn |
| i_p | broj prolaza alata |
| j | gustoća struje, $\mu\text{A cm}^{-2}$ |
| j_a | gustoća anodne struje, $\mu\text{A cm}^{-2}$ |
| j_k | gustoća katodne struje, $\mu\text{A cm}^{-2}$ |
| j_{kor} | gustoća korozijske struje, A cm ⁻² i $\mu\text{A cm}^{-2}$ |
| j_0 | gustoća struje izmjene, $\mu\text{A cm}^{-2}$ |
| K | konstanta u jednadžbi trošenja alata, mm ⁻² ili godišnje kamate (anuitet), kn |
| KF | udaljenost fronte kratera na prednjoj površini alata od glavne oštrice, mm |
| KI | indeks kraterskog trošenja na prednjoj površini alata |

| | |
|-----------------------|--|
| <i>KM</i> | udaljenost središta kratera na prednjoj površini alata od početne glavne oštrice, mm |
| <i>KT</i> | dubina kratera na prednjoj površini alata, mm |
| <i>KU</i> | udarni rad loma, J |
| <i>k</i> | toplinska vodljivost, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ili kamatna stopa, % ili broj faktora |
| <i>k_a</i> | eksponent dubine rezanja u proširenoj Taylorovoj jednadžbi postojanosti alata |
| <i>k_f</i> | eksponent posmaka u proširenoj Taylorovoj jednadžbi postojanosti alata |
| <i>k_s</i> | specifična sila rezanja za materijal, $N\ mm^{-2}$ |
| <i>k_t</i> | eksponent vremena u jednadžbi trošenja alata |
| <i>k_v</i> | eksponent brzine rezanja u Taylorovim jednadžbama postojanosti alata |
| <i>k₁</i> | eksponent brzine rezanja u jednadžbi trošenja alata |
| <i>k₂</i> | eksponent posmaka u jednadžbi trošenja alata |
| <i>k₃</i> | eksponent dubine rezanja u jednadžbi trošenja alata |
| <i>L</i> | duljina prolaza alata, mm |
| <i>L_{ph}</i> | duljina povratnog hoda alata nakon prolaza, mm |
| <i>l</i> | referentna dužina, mm |
| <i>l_i</i> | duljina izlaznog hoda alata, mm |
| <i>l_p</i> | duljina za obradu, mm |
| <i>l_u</i> | duljina ulaznog hoda alata, mm |
| <i>MS</i> | srednji kvadrati |
| <i>m</i> | Taylorov eksponent |
| <i>N</i> | broj eksperimentalnih opažanja ili mjerenja (veličina uzorka) |
| <i>N_{pl}</i> | broj pritezanja reznih oštrica u radnom vijeku držača |
| <i>n</i> | frekvencija vrtnje motorvretena, min^{-1} |
| <i>n_g</i> | broj godina otpisa alatnog stroja |
| <i>n_s</i> | veličina serije (planirani broj komada) |
| <i>n₀</i> | broj ponavljanja pokusa u središtu plana |
| <i>OD</i> | godišnje održavanje, kn |
| <i>OS</i> | godišnje osiguranje, kn |
| <i>OT</i> | godišnji otpis (amortizacija), kn |
| <i>o</i> | stopa osiguranja, % |
| <i>P_{as}</i> | angažirana snaga stroja za vrijeme rezanja, kW |
| <i>P_k</i> | snaga kompresora za zrak, kW |
| <i>P_p</i> | snaga pumpe za emulziju, kW |
| <i>P_s</i> | instalirana snaga alatnog stroja, kW |

| | |
|-------------|--|
| P_{sp} | snaga alatnog stroja u pripravnosti, kW |
| Q | produktivnost, komad/min |
| Q_{dk} | dobava zraka kompresorom, l/min |
| Q_v | protok zraka kroz vrtložnu cijev, l/min |
| R | rezultirajuća sila rezanja, N ili opća plinska konstanta = $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ |
| R^2 | koeficijent determinacije |
| Ra | srednje aritmetičko odstupanje profila, μm |
| R_m | vlačna čvrstoća, MPa |
| R_{\max} | maksimalna visina neravnina profila, μm |
| $R_{p0,2}$ | granica tečenja, MPa |
| Rz | srednja visina neravnina profila, μm |
| SS | suma kvadrata |
| T | postojanost rezne oštrice alata, min ili apsolutna temperatura, K |
| T_G | broj radnih tjedana godišnje |
| TRP | godišnji troškovi radnog prostora, kn |
| t | vrijeme, min i s ili varijabla Studentove razdiobe |
| t_a | komadno alatno vrijeme, min |
| t_{a1} | vrijeme zamjene rezne oštrice, min |
| t_g | glavno strojno vrijeme, min |
| t_n | komadno neproizvodno vrijeme, min |
| t_p | vrijeme pozicioniranja alata za obradu, min |
| t_{pz} | pripremno-završno vrijeme, min |
| t_{so} | vrijeme potrebno za uzimanje, stezanje, otpuštanje i otpremanje komada, min |
| t_1 | jedinično proizvodno vrijeme, min |
| VB | srednja širina pojasa trošenja na stražnjoj površini alata, mm |
| VB_{\max} | maksimalna širina pojasa trošenja na stražnjoj površini alata, mm |
| VN | veličina ureznog trošenja na stražnjoj površini alata, mm |
| v_c | brzina rezanja, m min^{-1} |
| v_f | posmična brzina, mm min^{-1} |
| v_{korE} | trenutna brzina korozije, mm/godina |
| v_{korG} | prosječna brzina korozije, mm/godina |
| v_{ph} | programirana brzina povratnog hoda alata, mm min^{-1} |
| v_{sh} | brzina smicanja, m min^{-1} |
| v_γ | brzina strugotine, m min^{-1} |

| | |
|----------|---|
| z | kontrakcija, % ili broj elektrona uključenih u reakciju elektrode |
| z_{pl} | broj reznih oštrica na pločici |
| z_T | broj obrađenih komada po reznoj oštrici |

Grčka slova

| | |
|-------------|--|
| Δm | gubitak mase uzorka, g |
| Φ | kut smicanja, ° |
| α | udaljenost od središta u Box-Wilsonovom okretljivom centralno kompozitnom planu pokusa ili koeficijent prijenosa |
| α_n | normalni stražnji kut alata |
| γ_n | normalni prednji kut alata |
| η | prenapon, V ili djelotvornost obradnog sustava |
| η_s | stupanj iskoristivosti alatnog stroja |
| π | Ludolfov broj = 3,141592(6535...) |
| ρ | kut vanjskog kliznog trenja, ° ili gustoća ispitnog materijala, g cm ⁻³ |
| ρ_{sh} | kut unutarnjeg kliznog trenja |

Kratice

| | |
|-------|---|
| ASTM | američka normizacijska organizacija – <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BUE | naljepak (engl. <i>Built-Up Edge</i>) |
| CCD | centralno kompozitni plan pokusa (engl. <i>Central Composite Design</i>) |
| CNC | računalno numeričko upravljanje (engl. <i>Computer Numerical Control</i>) |
| DIN | njemačke norme ili institut za norme – <i>Deutsches Institut für Normung</i> |
| EDS | energijski razlučujuća/disperzivna rendgenska spektroskopija (engl. <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>) |
| EM | emulzija |
| engl. | engleski |
| HB | tvrdća prema Brinellovoj metodi |
| HRN | hrvatske norme |
| ISO | Međunarodna organizacija za normizaciju (engl. <i>International Organization for Standardization</i>) |

| | |
|------|--|
| MQCL | rashladno podmazivanje minimalnom količinom (engl. <i>Minimum Quantity Cooling Lubrication</i>) |
| MLQ | podmazivanja minimalnom količinom (engl. <i>Minimum Quantity Lubrication</i>) |
| NC | numeričko upravljanje (engl. <i>Numerical Control</i>) |
| OoW | tanki uljni film na kapljici vode (engl. <i>Oil-on-Water</i>) |
| OS | osnovni uzorak |
| SEM | pretražna/skenirajuća elektronska mikroskopija (engl. <i>Scanning Electron Microscopy</i>) |
| SHIP | sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje |
| VC | vertložna cijev |

POPIS SLIKA

| | | |
|--------------------|---|----|
| Slika 2.1. | Gibanja alata i obratka kod primarnih postupaka obrade rezanjem | 10 |
| Slika 2.2. | Zone smicanja kod stvaranja strugotine | 11 |
| Slika 2.3. | Ovisnost oblika strugotine o mehaničkim svojstvima materijala obratka..... | 12 |
| Slika 2.4. | Sustavi sila kod tokarenja..... | 13 |
| Slika 2.5. | Distribucija topline i temperature u obratku, strugotini i alatu pri obradi čelika alatom od tvrdog metala | 14 |
| Slika 2.6. | Mehanizmi trošenja alata..... | 15 |
| Slika 2.7. | Najvažniji oblici trošenja reznih pločica | 15 |
| Slika 2.8. | Karakteristični parametri trošenja prednje i stražnje površine alata prema normi ISO 3685:1993(E)..... | 16 |
| Slika 2.9. | Određivanje Taylorovog pravca | 18 |
| Slika 2.10. | Karakteristične zavisnosti postojanosti alata T od brzine rezanja v_c , posmaka f i dubine rezanja a_p u ln-ln koordinatama..... | 18 |
| Slika 2.11. | Određivanje parametara hrapavosti R_a , R_z i R_{max} unutar referentne dužine l | 19 |
| Slika 2.12. | Primjer poželjnog profila zaostalih naprezanja u površinskom sloju materijala obratka | 21 |
| Slika 3.1. | Učinak podmazivanja na stvaranje strugotine..... | 24 |
| Slika 3.2. | Usporedba djelovanja slobodnog i visokotlačnog mlaza SHIP-a | 25 |
| Slika 3.3. | Diseminacija SHIP-a u okoliš | 27 |
| Slika 3.4. | Fotografija ruku zahvaćenih SHIP-om uzrokovanim dermatitisom koja pokazuje suhu ljuskavu i ispucanu kožu | 28 |
| Slika 3.5. | Troškovi primjene SHIP-a kod konvencionalne mokre obrade metala rezanjem | 29 |
| Slika 3.6. | Pristupi za postizanje ekološki prihvatljive obrade..... | 29 |
| Slika 3.7. | Sustav ohlađenog komprimiranog zraka | 32 |
| Slika 3.8. | Kriogeno hlađenje komprimiranog zraka (shema)..... | 33 |
| Slika 3.9. | Načelo rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka (shema) | 34 |
| Slika 4.1. | Pasivni film na površini nehrđajućih čelika. | 36 |
| Slika 4.2. | Primjeri mikrostruktura nehrđajućih čelika..... | 36 |
| Slika 4.3. | Karakteristična područja smještaja skupina nehrđajućih čelika u Schaeffler- ovom dijagramu..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.4. Opća korozija | 40 |
| Slika 4.5. Rupičasta korozija | 41 |
| Slika 4.6. Transkristalno širenje pukotina u austenitnom nehrđajućem čeliku X5CrNi18-10/EN1.4301 | 42 |
| Slika 4.7. Parametri profila obodnih zaostalih naprezanja nakon tokarenja nehrđajućih čelika | 45 |
| Slika 4.8. Indeksi obradivosti nekih nehrđajućih čelika s obzirom na etalonski materijal X12CrS13/EN 1.4005 | 47 |
| Slika 5.1. Mikrostruktura ispitnog materijala X20Cr13 pri povećanju 200x (nagriženo s 5 % HNO ₃ u otopini) | 49 |
| Slika 5.2. Nacrt obratka i prolazi s različitim dubinama rezanja a_p | 49 |
| Slika 5.3. Laboratorijska CNC tokarilica TU 360 Prvomajska | 50 |
| Slika 5.4. SECO rezna pločica DNMG 150608-MF-4 TP 2501 | 50 |
| Slika 5.5. SECO držač pločice PDN JL 2525M15 | 50 |
| Slika 5.6. Emulgirajuća tekućina za obradu metala INA BU 7 | 51 |
| Slika 5.7. Klipni kompresor Presing B7000 | 51 |
| Slika 5.8. Protusmjerna vrtložna cijev Nex Flow TM Frigid-X Cooler System c/w 57025AD | 51 |
| Slika 5.9. Elektrokemijska ćelija | 53 |
| Slika 5.10. Shematski prikaz Tafelove metode ekstrapolacije | 55 |
| Slika 5.11. Laboratorijska vaga i uzorci (OS2, EM2 i VC2) uronjeni u elektrolit (3,5 %-tna vodena otopina NaCl temperature 25 °C) | 56 |
| Slika 5.12. Uređaji za SEM/EDS analizu | 57 |
| Slika 5.13. Okretljivi CCD za tri faktora | 58 |
| Slika 5.14. Eksperimentalna konfiguracija za ispitivanje obradivosti | 60 |
| Slika 5.15. Zavisnost potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za osnovni (neobrađeni) uzorak X20Cr13 (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C) | 63 |
| Slika 5.16. Zavisnost potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje emulzijom (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C) | 63 |
| Slika 5.17. Zavisnost potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C) | 64 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.18. Usporedba zavisnosti potencijala kod otvorenog strujnog kruga od vremena za ispitivane uzorke X20Cr13 u 3,5 %-tnoj vodenoj otopini NaCl na 25 °C..... | 64 |
| Slika 5.19. Potenciodinamičke polarizacijske krivulje za osnovni (neobrađeni) uzorak X20Cr13 (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)..... | 66 |
| Slika 5.20. Potenciodinamičke polarizacijske krivulje za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje emulzijom (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)..... | 66 |
| Slika 5.21. Potenciodinamičke polarizacijske krivulje za uzorak X20Cr13 tokaren uz hlađenje vrtložnom cijevi (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)..... | 67 |
| Slika 5.22. Usporedba potenciodinamičkih polarizacijskih krivulja za ispitivane uzorke X20Cr13 (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, brzina pretraživanja 0,166 mV/s)..... | 67 |
| Slika 5.23. Usporedba gravimetrijskih v_{korG} i elektrokemijskih v_{korE} brzina korozije za ispitivane uzorke X20Cr13..... | 69 |
| Slika 5.24. SEM/EDS analiza osnovnog (neobrađenog) uzorka X20Cr13..... | 70 |
| Slika 5.25. SEM/EDS analiza osnovnog (neobrađenog) uzorka X20Cr13 nakon izlaganja elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, 30 min)..... | 71 |
| Slika 5.26. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje emulzijom..... | 72 |
| Slika 5.27. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje emulzijom nakon izlaganja elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, 30 min)..... | 73 |
| Slika 5.28. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi ... | 74 |
| Slika 5.29. SEM/EDS analiza uzorka X20Cr13 tokarenog uz hlađenje vrtložnom cijevi nakon izlaganja elektrolitu (3,5 %-tna vodena otopina NaCl na 25 °C, 30 min) | 75 |
| Slika 5.30. Usporedba rezultata mjerenja hrapavosti obrađene površine..... | 77 |
| Slika 5.31. Zavisnost hrapavosti obrađene površine od parametara rezanja prema matematičkom modelu (5.13) za tokarenje ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje emulzijom | 80 |
| Slika 5.32. Zavisnost hrapavosti obrađene površine od parametara rezanja prema matematičkom modelu (5.14) za tokarenje ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje vrtložnom cijevi..... | 81 |
| Slika 5.33. Trošenje alata u pokusu 1 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm)..... | 85 |
| Slika 5.34. Trošenje alata u pokusu 2 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm)..... | 85 |

| | |
|--|-----|
| Slika 5.35. Trošenje alata u pokusu 3 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm) | 85 |
| Slika 5.36. Trošenje alata u pokusu 4 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,3$ mm) | 86 |
| Slika 5.37. Trošenje alata u pokusu 5 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm) | 86 |
| Slika 5.38. Trošenje alata u pokusu 6 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,2$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm) | 86 |
| Slika 5.39. Trošenje alata u pokusu 7 ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm) | 87 |
| Slika 5.40. Trošenje alata u pokusu 8 ($v_c = 270$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 0,5$ mm) | 87 |
| Slika 5.41. Trošenje alata u pokusu 9 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 87 |
| Slika 5.42. Trošenje alata u pokusu 10 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 88 |
| Slika 5.43. Trošenje alata u pokusu 11 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 88 |
| Slika 5.44. Trošenje alata u pokusu 12 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 88 |
| Slika 5.45. Trošenje alata u pokusu 13 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 89 |
| Slika 5.46. Trošenje alata u pokusu 14 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 89 |
| Slika 5.47. Trošenje alata u pokusu 15 ($v_c = 136$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 89 |
| Slika 5.48. Trošenje alata u pokusu 16 ($v_c = 304$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 90 |
| Slika 5.49. Trošenje alata u pokusu 17 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,13$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 90 |
| Slika 5.50. Trošenje alata u pokusu 18 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,47$ mm/o i $a_p = 0,4$ mm) | 90 |
| Slika 5.51. Trošenje alata u pokusu 19 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,23$ mm) | 91 |
| Slika 5.52. Trošenje alata u pokusu 20 ($v_c = 220$ m/min, $f = 0,3$ mm/o i $a_p = 0,57$ mm) | 91 |
| Slika 5.53. Zavisnosti normalne vjerojatnosti od vrijednosti ostataka za pokuse postojanosti alata | 94 |
| Slika 6.1. Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od brzine rezanja i posmaka kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje emulzijom (dubina rezanja $a_p = 0,5$ mm) | 106 |
| Slika 6.2. Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od brzine rezanja i posmaka kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 uz hlađenje vrtložnom cijevi (dubina rezanja $a_p = 0,5$ mm) | 106 |
| Slika 6.3. Zavisnost jediničnog proizvodnog troška od brzine rezanja kod tokarenja ispitnog materijala X20Cr13 (posmak $f = 0,2$ mm, dubina rezanja $a_p = 0,5$ mm) | 107 |

POPIS TABLICA

| | | |
|----------------------|---|----|
| Tablica 2.1. | Kriteriji istrošenosti alata – preporuke..... | 17 |
| Tablica 2.2. | Hrapavosti koje se mogu postići različitim postupcima obrade rezanjem..... | 20 |
| Tablica 3.1. | Vrste i osnovni sastav SHIP-ova..... | 26 |
| Tablica 3.2. | Usporedba vrsta SHIP-ova..... | 27 |
| Tablica 4.1. | Osnovne skupine nehrđajućih čelika s nekim primjerima | 38 |
| Tablica 4.2. | Stupnjevi otpornosti čelika na opću koroziju..... | 40 |
| Tablica 4.3. | PRE vrijednosti nekih nehrđajućih čelika..... | 41 |
| Tablica 4.4. | Glavni utjecaji na obradivost | 46 |
| Tablica 4.5. | Tehnička svojstva karakterističnih nehrđajućih čelika | 46 |
| Tablica 5.1. | Kemijski sastav ispitnog materijala X20Cr13..... | 48 |
| Tablica 5.2. | Mehanička svojstva ispitnog materijala X20Cr13 na sobnoj temperaturi | 48 |
| Tablica 5.3. | Matrica okretljivog CCD s tri faktora za opis nelinearnih odziva | 59 |
| Tablica 5.4. | Vrijednosti parametara rezanja i njihovi kodovi..... | 60 |
| Tablica 5.5. | NC programi za prvi prolaz obrade ($v_c = 170$ m/min, $f = 0,4$ mm/o i $a_p = 5$ mm)..... | 61 |
| Tablica 5.6. | Potencijali kod otvorenog strujnog kruga | 65 |
| Tablica 5.7. | Tafelovi podaci i elektrokemijske brzine korozije..... | 68 |
| Tablica 5.8. | Gravimetrijske brzine korozije (3,5 %-tna vodena otopina NaCl, 25 °C, 14 dana) | 68 |
| Tablica 5.9. | Rezultati mikrokemijske analize površina uzoraka..... | 76 |
| Tablica 5.10. | Rezultati mjerenja hrapavosti obrađene površine | 77 |
| Tablica 5.11. | F -test dva uzorka Ra | 78 |
| Tablica 5.12. | Studentov t -test dva uzorka Ra | 78 |
| Tablica 5.13. | Višestruka regresijska analiza (Excel) za matematički model (5.13) u kodiranom obliku..... | 79 |
| Tablica 5.14. | Višestruka regresijska analiza (Excel) za matematički model (5.14) u kodiranom obliku..... | 80 |
| Tablica 5.15. | Rezultati mjerenja trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje emulzijom..... | 82 |
| Tablica 5.16. | Rezultati mjerenja trošenja alata kod tokarenja uz hlađenje vrtložnom cijevi | 83 |
| Tablica 5.17. | Rezultati postojanosti alata ($V_B = 0,5$ mm) | 92 |

| | |
|--|-----|
| Tablica 5.18. Višestruka regresijska analiza (Excel) za model postojanosti alata (5.15).... | 93 |
| Tablica 5.19. Višestruka regresijska analiza (Excel) za model postojanosti alata (5.16).... | 94 |
| Tablica 6.1. Opći ulazni podaci za troškovnu evaluaciju obrade po kategorijama..... | 102 |
| Tablica 6.2. Operativna satnica alatnog stroja | 103 |
| Tablica 6.3. Operativna satnica uporabe emulzije | 103 |
| Tablica 6.4. Operativna satnica uporabe vrtložne cijevi | 104 |
| Tablica 6.5. Struktura jediničnog proizvodnog troška | 104 |
| Tablica 6.6. Struktura troška uporabe rashladnog medija..... | 107 |

ŽIVOTOPIS

Tihana Kostadin rođena je 14. rujna 1969. u Zagrebu. U Karlovcu je završila osnovnu školu i Gimnaziju, kao i Glazbenu školu. Diplomirala je 1993. na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, VI stupanj (smjer: proizvodno strojarstvo) i stekla zvanje inženjera strojarstva. Sveučilišni diplomski studij strojarstva (smjer: inženjerstvo materijala) na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci upisuje 2008., gdje je i diplomirala 14. 7. 2010. te stekla akademski naziv magistra inženjerka strojarstva. Diplomski rad pod naslovom *Utjecaj shot peeninga i poliranja materijala lopatice parne turbine na otpornost na jamičastu (pitting) koroziju* izradila je pod mentorstvom prof. dr. sc. Lorete Pomenić. Akademске godine 2011./2012. upisuje poslijediplomski doktorski studij iz tehničkih znanosti na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci (modul: proizvodno strojarstvo).

Od 1. 9. 1994. do 19. 12. 2007. je bila zaposlena u Zajednici tehničke kulture Karlovac, gdje je radila kao tajnik Zajednice, a ujedno je bila i stručni voditelj Informatičke škole koja djeluje u sastavu Zajednice. Ima položene sve ECDL ispite i tako posjeduje Europsku računalnu diplomu.

Od akademske godine 2005./2006. radi kao vanjski suradnik Veleučilišta u Karlovcu, a od 20. 12. 2007. primljena je u stalni radni odnos, s punim radnim vremenom. Sada radi kao viši predavač (datum zadnjeg izbora: 18. 12. 2017.) na Strojarskom odjelu Veleučilišta u Karlovcu i nositelj je kolegija: *Materijali I, Materijali II, Tehnički materijali, Ispitivanje materijala, Nemetalni i kompozitni materijali i Studentska praksa – strojarstvo.*

Autorica je ili koautorica više stručnih i znanstvenih radova, uglavnom s područja materijala i tehnologija u strojarstvu.

Potpuno vlada engleskim jezikom u govoru i pismu, a služi se i talijanskim jezikom.

Udata je i majka kćeri Lucije, studentice. Sa suprugom i kćeri živi u Karlovcu, na adresi Kralja Zvonimira 10.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. Žagar-Maričić, A., Božić, T., Kostadin, T.: *Investigation of feasibility of thermo-chemical treatment on corrosion resistance of steel*. Proceedings CIM 2007, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, pp. 367-371, 2007.
2. Pomenić, L., Kostadin, T.: *Utjecaj obrade površine na korozijska svojstva materijala za turbinske lopatice*. Zbornik radova KORMAT 2012, Zagreb, pp. 15-26, 2012.
3. Kostadin, T., Mihalić, A., Crnković, T.: *Possibility of quality control of non-standard polymer products with compression testing*. Proceedings CIM 2013, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, pp. 155-160, 2013.
4. Kostadin, T., Cukor, G.: *An overview of the development and use of coolant and lubricant systems in machining*. Proceedings CIM 2015, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, pp. 153-160, 2015.
5. Kostadin, T.: *Sigurnost rada u laboratoriju za ispitivanje materijala*. Zbornik radova VI. Međunarodnog stručno-znanstvenog skupa "Zaštita na radu i zaštita zdravlja", Karlovac, pp. 351-355, 2016.
6. Kostadin, T., Cukor, G., Jakovljević, S.: *Analysis of corrosion resistance when turning martensitic stainless steel X20Cr13 under chilled air-cooling*. Advances in Production Engineering & Management 12 (2), pp. 105-114, 2017.
7. Kostadin, T., Cukor, G., Jurković, Z.: *Multi-response optimization of X20Cr13 steel turning under vortex tube cooling using grey relational analysis*. Proceedings CIM 2017, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, pp. 165-170, 2017.
8. Runje, V., Mihalić, T., Kostadin, T.: *Improvement of a weedhopper 2 ultralight aircraft by using modern materials*. JET Journal of Energy Technology 11 (4), pp. 29-40, 2018.
9. Kostadin, T., Cukor, G.: *Ekološki prihvatljiva strojna obrada*. Zbornik radova VII. Međunarodnog stručno-znanstvenog skupa "Zaštita na radu i zaštita zdravlja", Karlovac, pp. 496-501, 2018.
10. Kostadin, T., Cukor, G., Jurković, Z.: *Influence of cutting fluids on the corrosion resistance of X20Cr13 martensitic stainless steel*. International Journal of Electrochemical Science 13 (12), pp. 11986-11999, 2018.
11. Kostadin, T., Cukor, G., Mihalić, T.: *Primjena ekoloških načela u obradi metala odvajanjem čestica*. Sigurnost 61 (2), pp. 85-93, 2019.
12. Cukor, G., Šterpin-Valić, G., Kostadin, T., Fabić, M.: *Sustainable turning of martensitic stainless steel*. Transactions of FAMENA, prihvaćeno za objavljivanje, 2019.