



**УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ**



**Мр Десимир Н. Јовановић**

**УТИЦАЈ ФАКТОРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА  
ТЕХНОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРЕВЛАКА  
КОД ПРОИЗВОДА НАМЕНСКЕ ИНДУСТРИЈЕ**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Ниш, 2018.



**UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**



**Desimir N. Jovanović**

**INFLUENCE OF THE PROCESS PARAMETERS  
ON TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS  
OF COATINGS USED IN DEFENSE INDUSTRY**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

*За Анђелију и Ану*

Ментор:

Проф. Др Предраг Јанковић, ванредни професор  
Универзитет у Нишу, Машински факултет

Наслов:

Утицај фактора процеса обраде на технолошке карактеристике  
превлака код производа наменске индустрије

Резиме:

Предмет истраживања дисертације је утицај фактора процеса обраде на карактеристике заштитних галванских превлака на деловима наоружања. Испитивање је извршено са превлакама цинка и хрома, као превлакама које се најчешће примењују за заштиту металних елемената.

Код обе испитиване превлаке вариране су карактеристике подлоге (храпавост и тврдоћа) за њихово наношење у зависности од начина добијања, односно примењене технологије завршне обраде и параметри електролизе, густина струје и време таложења. Поред класичних метода за карактеризацију превлака, дефинисаних стандардима у раду су примењене и методе које се ређе срећу код испитивања галванских превлака, као што су "scratch" тест за одређивање адхезије и испитивање триболошких карактеристика исталожених превлака.

Спољни изглед превлака оцењиван је визуелно, а морфологија методом оптичке микроскопије и применом АФМ микроскопа. Дебљина превлака одређивана је магнетном методом. Приањање превлака за основни метал одређивано је стандардизованим методама, методом загревања и "scratch" тестом. Испитивање микротврдоће вршено је по методи Викерс  $HV_{0.1}$ . Триболошка испитивања су извршена у условима са "block-on-disk" контактном геометријом, а добијени трагови хабања су квантификовани употребом оптичког мерног микроскопа.

Свеобухватном анализом добијених резултата утврђен је утицај фактора процеса на поједине карактеристике електролитичких превлака цинка и хрома.

Реализована истраживања створила су основу за развој експертног система у области галванских превлака.

У оквиру рада дата су полазна знања о експертном систему и неуронским мрежама за креирање базе података и развој модула за предвиђање карактеристика превлака на основу параметара таложења.

Научна област:  
Научна  
дисциплина:

Машинско инжењерство

Производни системи и технологије

Кључнеречи:

Фактор процеса, галванске превлаке цинка, галванске превлаке хрома, карактеризација превлака

УДК:

621.9; 621.793/795; 669.58; 669.268

CERIF  
класификација:

T 130 Производна технологија

T 155 Превлаке и површинскаобрада

Тип лиценце  
Креативне  
заједнице:

**CC BY-NC-ND**

### Data on Doctoral Dissertation

Doctoral  
Supervisor:

Predrag Janković, PhD, associate professor,  
University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering

Title:

INFLUENCE OF THE PROCESS PARAMETERS ON TECHNOLOGICAL  
CHARACTERISTICS OF COATINGS USED IN DEFENSE INDUSTRY

Abstract:

The research topic of this dissertation is on the impact of processing technology on the characteristics of protective galvanic coatings. Testing was performed with a coating of zinc and chromium, as well as coatings that are most commonly used to protect metal elements.

In both examined coatings varied characteristics of the substrate (roughness and hardness) for its application depending on the manner of production or applied technology, finishing and electrolysis parameters, current density and deposition time. In addition to the traditional methods for the characterization of coatings, the defined standards in the paper studied and methods that are less common in tests of metal coatings such as "scratch" test for the determination of adhesion and testing tribological characteristics of coatings deposited.

The external appearance of the coatings was evaluated visually, and morphology by optical microscopy and AFM microscopy application. The thickness of the coatings was determined by magnetic method. The adhesion of coatings to the base material is determined by standardized methods, method of heating and "scratch" test. Microhardness testing was performed by the method Vickers  $HV_{0.1}$ . Wear tests were performed under conditions with "block-on-disk" contact geometry and the resulting wear traces were quantified using optical measuring microscope.

Comprehensive analysis of results showed the influence of the surface condition of the individual characteristics of electrolytic coating of zinc and chromium.

Implemented comprehensive researches have created a basis for

the development of expert systems in the field of galvanic coatings. In the paper are given the starting point of knowledge about expert systems and neural networks for creation a database and development of modules for predicting the characteristics of the coatings on the basis of the deposition parameters.

Scientific Field:  
Scientific  
Discipline:

Mechanical engineering

Production systems and technology

Key Words:

Factor process, galvanic zinc coatings, galvanic chromium coatings, characterization of coatings

UDC:

621.9; 621.793/795; 669.58; 669.268

CERIF  
Classification:

T 130 Production technology

T 155 Coatings and surface treatment

Creative  
CommonsLicense  
Type:

**CC BY-NC-ND**

# С А Д Р Ж А Ј

<b>1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА .....</b>	<b>1</b>
1.1.3 значај превлака код наоружања.....	1
1.2 Историјски развој заштитних превлака .....	5
1.2.1 Превлаке цинка.....	8
1.2.2 Превлаке хрома.....	9
1.3 Предмет истраживања.....	12
1.4 Преглед досадашњих истраживања.....	13
1.5 Циљ и сврха истраживања .....	23
1.6 Основне хипотезе рада .....	23
1.7 Очекивани научни допринос истраживања.....	24
1.8 Преглед садржаја дисертације .....	24
<b>2. ТЕХНОЛОШКО НАСЛЕЂЕ.....</b>	<b>27</b>
<b>3. ПРИПРЕМА УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ .....</b>	<b>35</b>
3.1 Израда блокова за таложење превлака.....	35
3.2 Наношење превлака .....	40
3.2.1 Превлаке цинка.....	41
3.2.2 Превлаке хрома.....	42



<b>4. ИСПИТНА И МЕРНА ОПРЕМА</b> .....	<b>44</b>
4.1 Мерење тврдоће.....	44
4.2 Мерење микротврдоће.....	45
4.3 Мерење параметара топографије.....	47
4.4 Мерење дебљине превлака.....	48
4.5 Оптички микроскоп.....	49
4.6 Трибометар.....	51
4.7 Тест браздањем "scratch" тест.....	55
4.8 Микроскоп атомских сила.....	59
<b>5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА</b> .....	<b>62</b>
5.1 Превлаке цинка.....	63
5.1.1 Мерење дебљине.....	65
5.1.2 Морфологија превлака цинка.....	68
5.1.2.1 Анализа морфологије оптичким микроскопом.....	68
5.1.2.2 Анализа морфологије микроскопијом атомских сила.....	74
5.1.2.3 Храпавост превлака цинка.....	78
5.1.3 Испитивање адхезије.....	79
5.1.3.1 Испитивање методом загревања.....	79
5.1.3.2 "Scratch" тест- превлака цинка.....	81
5.1.4 Испитивање корозије.....	87
5.1.5 Триболошка испитивања превлака цинка.....	89
5.2 Превлаке хрома.....	95
5.2.1 Мерење дебљине.....	97
5.2.2 Морфологија превлака хрома.....	100
5.2.2.1 Анализа морфологије оптичким микроскопом.....	100
5.2.2.2 Анализа морфологије микроскопијом атомских сила.....	108
5.2.2.3 Храпавост превлака хрома.....	110

5.2.3	Микротврдоћа превлака хрома .....	111
5.2.4	Испитивање адхезије.....	114
5.2.4.1	Метода загревања.....	114
5.2.4.2	"Scratch" тест- превлака хрома.....	117
5.2.5	Триболошка испитивања превлака хрома.....	126
<b>6.</b>	<b>РАЗВОЈ ЕКСПЕРТНОГ СИСТЕМА У ОБЛАСТИ ГАЛВАНСКИХ ПРЕВЛАКА.....</b>	<b>132</b>
6.1	Примена вештачких неуронских мрежа .....	135
6.1.1	Вештачке неуронске мреже - основни појмови.....	135
6.1.1.1	Модел статичког неурона .....	138
6.1.1.2	Грађа вештачких неуронских мрежа .....	139
6.1.1.3	Тренирања вештачке неуронске мреже .....	140
6.1.1.4	Тестирање и валидација вештачке неуронске мреже .....	143
6.1.1.5	Процена тачности пресликавања вештачком неуронском мрежом.....	144
6.2	Моделирање вештачким неуронским мрежама.....	145
<b>7.</b>	<b>ЗАКЉУЧАК .....</b>	<b>154</b>
<b>8.</b>	<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>158</b>

# **1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА**

## **1.1 Значај превлака код наоружања**

Један од важних и перманентних задатака у производњи наоружања односи се на стално побољшање квалитета готових производа, њихове поузданости и трајности. Овим захтевима се у великој мери може одговорити управљањем технолошким процесима обраде, при чему се посебна пажња посвећује обезбеђивању тачности димензија делова и физичко-механичким карактеристикама површинских слојева. Нови производи наменске индустрије захтевају побољшана експлоатациона својства што се огледа у све већем коришћењу различитих галванских заштитних превлака. Код ових производа доминирају, тврде превлаке хрома и превлаке цинка (слике 1.1 - 1.3) у циљу побољшања експлоатационих карактеристика и превлаке никла и хрома у циљу испуњења декоративних захтева [39].



*Слика 1.1 Комора гасног повратника*

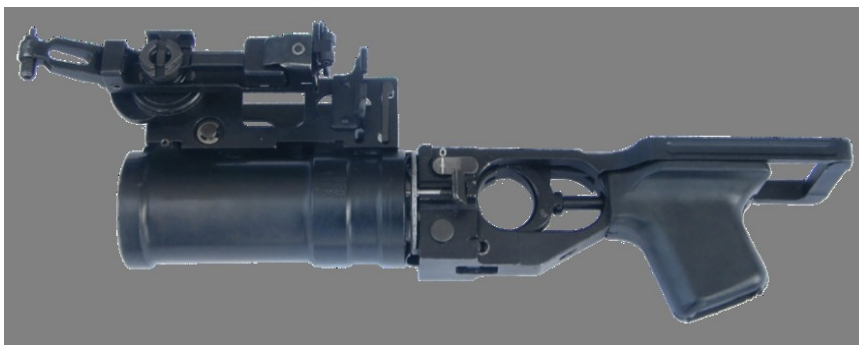


Слика 1.2 Више врста клипова стрелачког оружја



Слика 1.3 Делови за аутоматски бацач граната - 30 mm

Ако се анализира структура површинске заштите делова који улазе у склопове производа из програма фабрике *Застава оружје АД, Крагујевац*, запажа се да су галванске заштитне превлаке највише заступљене на подцевном бацачу граната (ПБГ), слика 1.4, где од 60 делова 8 има превлаку хрома а један превлаку цинка што чини 13% делова готовог производа.



**Слика 1.4** Подцевни бацач граната ПБГ- 40 mm

На аутоматском бацачу граната - 30 mm (АБГ- 30 mm), слика 1.5, од 340 делова израђених од различитих врста челика, 24 дела су превучена неком металном превлаком што чини 7% свих делова.



**Слика 1.5** Аутоматски бацач граната - 30 mm

Радни век ватреног оружја ограничен је услед комплексног процеса механичког и ерозионог хабања. Дејство барутних гасова утиче на пропадање цеви знатно више од трења у систему цев - зрно. Притисак гасова генерише велику силу која делује на жлебове што резултира њиховим заморним хабањем. Способност цеви се умањује са бројем испалених метака. У тренутку опаљења, притисак у цеви достиже вредност до 400 МРа, што је граница течења материјала.

Кретањем кроз цев, при изузетно великим брзинама и високим притисцима, зрно носи са собом честице са унутрашње површине цеви, а такође и честице материјала са површине зрна прелазе на унутрашњу површину цеви. Унутрашњи пречник се повећава, а компресија смањује. Барутни гасови улазе у настале пукотине и хабање се манифестује стварањем бразди и оштећења површине.

Одговарајућим конструктивним и технолошким решењима цеви, обезбеђује се спорије хабање, односно ерозија, што одржавање чини ефикаснијим и лакшим. Један од повољних и тренутно најзаступљенијих начина да се повећа отпорност унутрашњих површина цеви на механичка, термичка и хемијска дејства је наношење заштитних превлака од електролитичког хрома [40, 76].

На већини производа из војног програма (митраљеви, снајперске пушке, аутоматске пушке, пиштољи) унутрашња траса цеви је хромирана (слика 1.6).



*а) Цев за митраљез М-84*



*б) Цев за пиштољ ЦЗ-999*

**Слика 1.6** *Више врста цеви*

Анализама досадашњих резултата истраживања [43, 44, 45, 66, 105, 116] видљиво је да утицај основног материјала, односно подлоге на коју је превлака нанета, још увек није у потпуности разграничен упркос многим квалитативним и искуственим сазнањима. Стога истраживања утицаја основних карактеристика подлоге, тврдоће и топографије површине, на карактеристике исталожених металних превлака представља логичан први корак у детаљном разумевању како процеса хабања у систему основни материјал - превлака, тако и осталих својстава превлака, адхезије, тврдоће, отпорности на корозију, порозност и друго.

## **1.2 Историјски развој заштитних превлака**

Технологија електролитичког наношења металних превлака на конструктивне материјале настала је почетком 19. века. Галванске превлаке наносе се да би површина основног материјала добила неке од следећих особина: отпорност према корозији, отпорност на хабање, веће димензије, већу или мању електричну проводљивост, бољу лемљивост, интензивнији сјај, већу или мању магнетичност, мањи коефицијент трења или бољи естетски изглед [89, 93]. Галванотехника се несметано развијала осим у периоду велике светске економске кризе тридесетих година прошлог века. Чак се и током два светска рата нормално развијала јер је индустрији наоружања и војне опреме била потребна заштита површина изложених хабању и атмосферском утицају.

У току 20. века остварена су следећа важнија унапређења поступка [92]:

- густине струје које се користе у производном процесу повећане су за многе поступке 10 до 1000 пута уз адекватно убрзање превлачења (обично до вредности око 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  и више),
- око 1930. г. нагло се проширила примена галванског хромирања, како декоративног тако и тврдог (против абразије) директно на челичну подлогу,
- око 1930. г. почели су се у галванске електролите додавати и додаци за сјај чиме је избегнута појава мутних ("мат") превлака при таложењу дебљих превлака; после 1945. г. уносе се у електролите и додаци који при расту превлаке повећавају сјај у односу на подлогу, што је омогућило широку примену заштитно-декоративних галванских превлака Ni, Cu, Sn, Ag и тд.,
- после 1945. г. ротациони генератори струје замењују се сувим исправљачима, који су поузданији јер немају покретних делова, а омогућују једноставну регулацију напона и јачине струје, што је врло важно за добијање квалитетних превлака,
- развијени су поступци наношења вишеслојних галванских превлака (нпр. дуплекс-никловање, комбиновано бакарисање, никловање и хромирање итд.), чиме се повећава трајност превлака и постижу специфичне карактеристике,

- уведене су многе друге иновације (нпр. таложeње композитних или дисперзијских превлака с неметалним честицама у металној матрици, примена посебних облика струје као што су пулсирајућа и реверсна, превлачење пластике и тд.).

Од укупне количине исталожених металних превлака у свету су [31]:

- 25 % превлаке цинка,
- 20 % превлаке никла,
- 15 % превлаке бакра,
- 15 % превлаке хрома,
- 25 % остали метали.

Заштита од корозије је можда и најважнији задатак галванских превлака.

Корозија се дефинише као непожељно разарање материјала деловањем околине [15]. Према дефиницији корозије, кородирати могу не само метали већ и други материјали, керамика, полимерни материјали, стакло и сл. Међутим, кад се говори о корозији, а не помиње посебно материјал, мисли се на корозију метала. Брзина и ток корозије зависи од врсте метала који кородира, средине која га окружује. Корозија смањује масу метала и његову употребну вредност у облику сировине, полупроизвода и готовог производа. Она скраћује век трајања производа, поскупљује одржавање, изазива застоје у раду и смањује квалитет производа. Због корозије постају неупотребљиве много веће количине метала од оних што су кородирале, и то у облику готових конструкција чија је цена знатно виша од цене уграђеног материјала. Ово значи да поред директних трошкова губици изазвани корозијом могу бити знатно виши, јер корозија може бити узрок губитка производа, застоја у производњи, несрећа, загађења околине и слично.

Прва процена штете од корозије извршена је 1925. године у САД. Према овим истраживањима због корозије је годишње пропало око 2 %, укупно инсталисане челичне опреме или 8 000 000 тона челика. Према истраживањима у САД је, 1975. године чак 40% производње челика утрошено на замену кородираних делова. У периоду од 1999. до 2001.године, годишњи трошкови изазвани корозијом у САД износе чак 275.7 милијарди долара, или око 3.1% њиховог бруто националног приходка (БНД). Ови трошкови обухватају процењену штету насталу услед корозије као и трошкове заштите конструкцијских материјала. Студијом је



утврђено да је штета за трећину могла бити нижа да је била ефикаснија заштита производа од корозије. Утврђено је да годишњи трошкови због корозије метала, укључујући и мере заштите од корозије, износе у високоиндустријским земљама до 1000 долара по становнику [15]. Губици услед корозије у британској индустрији су 1971. године процењени на 1365 милијарди фунти или 3.5% БНД, плус 600 милиона фунти губитака у пољопривреди. Применом адекватне заштите од корозије штета је могла бити мања минимум 25 % [93]. У земљама бившег СССР због корозије постаје неупотребљиво скоро 30 % годишње производње челика. И мада се већи део тог материјала поново искористи, сматра се да ипак око 8% уграђеног челика због корозије неповратно страда. Добра антикорозивна заштита је ефикасно средство за смањење потреба за енергијом које имају зграде и конструкције. Сваких 90 секунди по целом свету једна тона челика претвори се у рђу [36]. Према извештајима Шведског института за корозију, од корозије је током последње 33. године пропало 44 % укупно произведеног челика [93].

Једна од највећих катастрофа изазвана корозијом је бродолом танкера *ЕРИКЕ*, слика 1.7, који је носећи 315 000 тона нафте, 1999. године у близини обале Велике Британије, пукао на пола и потонуо. Према извештајима Француске истраживачке агенције, *Bureau d Enquetes sur les Accidents en Mer* из јануара 2000. године, до несреће је дошло због корозије која је ослабила труп брода, што је изазвало прво његово савијање а на крају и бродолом [91].



**Слика 1.7** Бродолом танкера *ЕРИКЕ* [91]

Наоружање и војна опрема су, такође подложни корозији. Узрочници корозије наоружања и војне опреме су разноврсни и многобројни. Савремене армије снабдевене су бројним наоружањем и војном опремом који су потребни за одбрану земље у рату и нормалан живот и рад у миру. Наоружање и војна опрема на сталној и привременој употреби изложени су различитим напрезањима у различитим условима примене услед чега долази до замора материјала и оштећења заштитног слоја што, доводи до убрзане корозије неких материјала. Транспорт војних материјалних средстава од произвођача до корисника и често премештање из једне јединице у другу, са једног терена на други, доводе до јачих механичких и корозионих оштећења, што као последицу има краћи век трајања истих. Корозија наоружања и војне опреме може битно да смањи одбрамбену способност земље.

### **1.2.1 Превлаке цинка**

Цинк је метал светло-сиве боје, крт и релативно мекан. У влажном ваздуху и води прекрије се по површини белом скрамом оксида и карбоната цинка, која га даље штити од атмосферске корозије. Из овог разлога се и користи за заштиту челика од корозије, пошто у галванском спрегу цинк - гвожђе, цинк чини негативан пол, односно аноду. Топи се на 419 °С. Дебљина превлаке зависи од радних услова дела који се превлачи [30].

Превлаке цинка су најраспрострањеније превлаке јер је цинк јефтин метал, може се таложити из различитих електролита, има добру корозиону отпорност што је разлог да се поступци цинковања усавршавају из дана у дан. Превлаке цинка се најчешће користе за заштиту гвожђа и челика пошто у галванском спрегу цинк-гвожђе, цинк има улогу аноде и штити основни метал од корозије.

Потреба за цинком је тако порасла 1995. године са 7,5 мил. тона на 11 мил. тона, од којих се 47 % користи за антикорозивну заштиту. Таквом расту у великој мери допринела је Кина, која је највећи корисник цинка - на њу отпада 29 % светске потрошње и уједно је и највећи произвођач цинка са четвртином светске производње. Антикорозивна заштита цинковањем се користи за комплетни челични програм аутопутева (одбојне ограде, вертикалне сигнализације, ограде мостова, ..), челичне конструкције хала, кровне конструкције, цеви, цевне ограде, коване ограде, балконске ограде за јавну и индустријску употребу, решеткаста

газишта, шасије аутоприколица, пољопривредна опрема, новија сигнализацијска опрема за железнице и тд.

У 2007. години у Европи је цинковано приближно 3 мил. тона челичних конструкција хала, 1,15 мил. тона путног програма, 600.000 тона опреме индивидуалне потрошње (ограда,...), 550.000 тона опреме за пољопривреду, 450.000 тона аутомобилских делова, 500.000 тона индустријске челичне опреме, 200.000 тона вијака, 350.000 тона осталог металног материјала. Цинковање, заштита гвожђа и челика цинком је сигурно за околину најприхватљивији и доступнији поступак антикорозивне заштите. Отпорност према корозији електролитичке превлаке цинка може се побољшати накнадном обрадом - наношењем фосфатне или различитих типова хроматних превлака. Хроматне конверзионе превлаке се не смеју примењивати на површинама елемената који су у додиру са барутима, експлозивима и пиротехничким смешама.

### **1.2.2 Превлаке хрома**

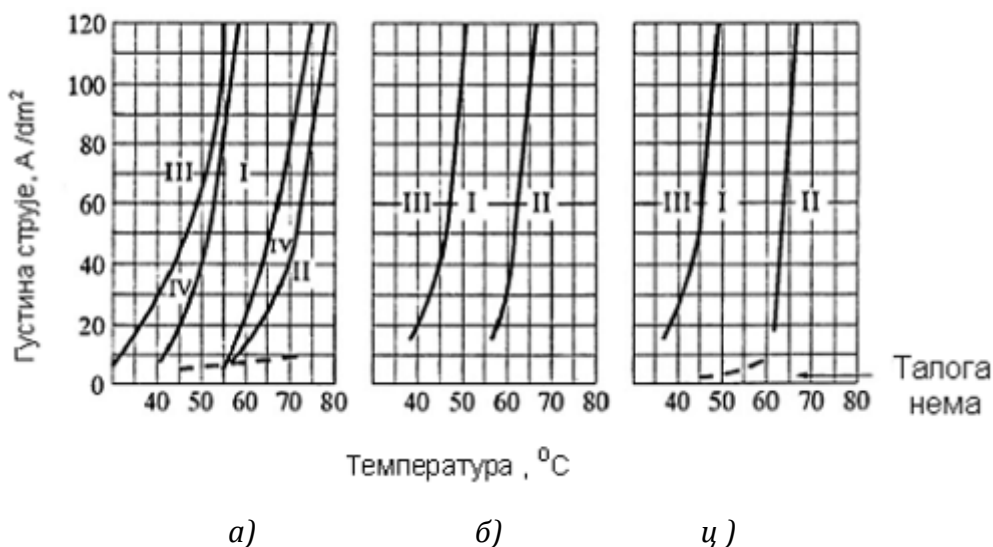
Хром је врло постојан метал у односу на разне хемијске утицаје. Раствара се у соној и врућој сумпорној киселини. За разлику од никла и сребра, задржава своју боју и сјај. Промена боје хрома настаје на температурама изнад 500 °С. Електролитички хром има ситнокристалну структуру, коју карактерише присуство два облика кристалне решетке: кубна запремински - центрирана и густо пакована хексагонална. Према Дубпернелу [25] први облик се назива  $\alpha$  - хром, топли или светли, стабилни, док се други хексагонални назива  $\beta$  - хром, хладни или мат и ово је нестабилан облик. Колики ће бити удео сваког од ова два облика у превлакама зависи од режима таложења превлака хрома. На вишим густинама струје и повишеним температурама електролита формира се првенствено кубна структура, при нижим густинама струје и на собној температури формира се углавном хексагонална структура. У реалним условима електролизе, при таложењу превлака сјајног хрома, у талозима увек има кубног облика (од 80 до 90%) и хексагоналног облика од (20 до 10%). Превлаке сјајног хрома таложене из хроматно-сулфатног електролита прекривене су мрежом прскотина. Прскотине настају као последица великих унутрашњих напрезања услед смањења запремине због преласка нестабилног  $\beta$  - хрома у стабилни  $\alpha$  - хром [75].

Разликују се три врсте хромних превлака:

- декоративне хромне превлаке - наносе се обично на превлаке бакра, никла, цинка и месинга да би се предмет украсио и заштитио од корозије,
- тврде хромне превлаке - користе се за повећање трајности површина предмета који су изложени хабању или репарацију истрошених површина да се врате на првобитне мере,
- порозне хромне превлаке - користе се на површинама које се током експлоатације подмазују уљима.

Хромне превлаке су крајње шупљикаве чак и у дебелом слоју, па се зато хромирање за заштиту од корозије врши после наношења на површину предмета међу-превлака од других метала нпр. бакра и никла. Тако хром само штити слој под собом од механичких повреда и чува декоративни изглед предмета. Процес комбиновано заштитно - декоративне превлаке, кад је спољни слој хром, зове се декоративно хромирање. Дебљина слоја хрома у оваквом превлачењу не прелази 1  $\mu\text{m}$  тј. од 0,2 - 1,0  $\mu\text{m}$ . За добијање тврдих површина потребно је 0,2 - 0,5 mm па и више. Тврде превлаке хрома имају примену код производње различитих алата, машинских делова, штампарских ваљака, у индустрији наоружања и сл. Тврдоћа превлака галванског хрома зависи од густине струје и температуре електролита. Код превлака таложених једносмерном струјом из универзалног хроматно - сулфатног електролита тврдоћа се мења у распону од 400 - 1000 HV.

Режим таложења превлака хрома одређен је катодном густином струје и температуром електролита. Ови параметри показују битан утицај на искоришћење струје, спољни изглед и физичка својства превлака. При константном саставу електролита, са повећањем густине струје повећава се искоришћење струје, а са повећањем температуре електролита се смањује [71]. Радни интервал температуре у којем је могуће добити задовољавајуће талоге је у границама од 45 до 70 °C. Не допушта се да одступање од прописане температуре буде веће од 1 до 2 °C [25]. Мењајући режим таложења могуће је из једног истог електролита (хроматно-сулфатног електролита) добити различите превлаке хрома, млечне, сјајне или мат-сиве, као што је приказано на слици 1.8 [113]. Превлаке су таложене у сулфатним електролитима при различитој концентрацији  $\text{CrO}_3$  : а) 150  $\text{g dm}^{-3}$ , б) 250  $\text{g dm}^{-3}$ , ц) 350  $\text{g dm}^{-3}$ .



**Слика 1.8** Утицај режима талочења на спољни изглед превлаке [113]

*I - област сјајног хрома, II - област млечног хрома,*

*III - област сивог хрома, IV - област прелазних талога*

Режим талочења показује и битан утицај на структуру талога хрома. У зависности од услова електролитичког талочења хром кристалише у два основна облика и то: хром са просторно центрираном кубном решетком (постојан облик) и хром са хексагоналном решетком (непостојан облик). У процесу формирања талога, непостојани облик се поступно трансформише у постојани, уз истовремено издвајање водоника из кристалне решетке. Ова трансформација је праћена смањењем кристала (око 15%), скупљањем метала на катоди и појавом заосталих напона на истезање у превлакама хрома. Када вредност заосталих напона пређе границу чврстоће хрома, долази до појаве његовог пуцања уз настанак прскотина по површини. При даљем талочењу метала у следећим слојевима превлаке хрома под утицајем напона који се појављују у њима пуцају као и у претходним. Зато се превлаке састоје из великог броја слојева у којима прскотине прекривају једна другу. Унутрашња напрезања у превлакама хрома битно утичу на њихове карактеристике, као што су тврдоћа, порозност и отпорност на хабање. Унутрашња напрезања у превлакама могу се појавити и као последица завршне обраде превлаке, механичке и термичке. Са повећањем температуре електролита количина хексагоналног облика хрома у талогу се смањује, а самим тим и број прскотина у њему. Сјајни талози хрома имају густу мрежу прскотина, које се постепено смањују идући ка млечном хрому. Превлаке добијене на 70°C готово да немају прскотине [30, 52].

### **1.3 Предмет истраживања**

Научно-истраживачки радови дуги низ година су били усмерени на побољшање особина основних материјала од којих су направљени одређени машински делови. Међутим, таквим приступом нису решавани проблеми који се јављају због интеракције њихових површина у контакту са деловима са којима су у контакту, или околином која их окружује. Та интеракција се изражава кроз различите облике хабања и појавом корозије. Применом технологија инжењерства површина које обухватају модификовање или заштиту површина, добија се површински оплемењен машински елемент који у себи обједињује добре особине основног материјала и површинског слоја, које се никако не би могле постићи употребом само једне врсте материјала [13, 51, 92].

Због тога се бира основни материјал који ће задовољити конструктивне захтеве у погледу механичких својстава, технолошка својства у смислу обрадљивости те ценом као једним од важнијих фактора за пласман финалног производа а задовољавање површинских својстава постиже се модификовањем или заштитом површине. Један од важних и перманентних задатака је добијање што квалитетнијег финалног производа, односно његова поузданост у раду и трајност. Овим захтевима се у великој мери може удовољити управљањем технолошким процесима механичке обраде машинских елемената, и одговарајућим процесима модификовања површинских слојева.

Данас се под појмом технолошког наслеђа подразумевају физичко-механичке карактеристике обрађених површина машинских делова, настале као резултат претходних и завршних технолошких операција. Основна својства машинских елемената, наслеђена у току технолошког процеса израде, могу се поделити у две основне групе: својства везана за карактеристике материјала и својства микро и макроеometriје обрађене површине. У прву групу спадају параметри који карактеришу хемијски састав, структуру и напонско стање материјала у површинском слоју и др. Друга група карактерише микро и макроеometriју површина (храпавост, валовитост, овалност и др.) [2, 34, 35, 46, 48]. Проблем одређивања утицаја фактора процеса обраде на карактеристике коначног производа је веома комплексан јер у себи садржи утицај стања површине дела пре обраде (заостали напони, валовитост, храпавост итд.) утицај параметара процеса

обраде резањем (режими обраде, итд.), и утицај технологије наношења превлака [39,41, 42, 43]. Ради решавања овог проблема потребна су бројна експериментална истраживања. Из групе утицајних параметара свакако треба издвојити микро и макроеометрију, структуру и тврдоћу површинског слоја. Проблем је веома сложен, о чему говори и све веће интересовање истраживача многобројних лабораторија и појава нове савремене мерне опреме [114].

Трење и хабање одвијају се у контакту реалних површина, па је због тога све чешћи приступ смањењу трења и хабања деловањем само на површине у додиру и то комбинованом термохемијском обрадом (цементација, борирање ...) или превлачењем површина другим материјалом. У данашње време постоји велики број различитих поступака наношења заштитних превлака на основни материјал. Сваки од тих поступака има своје специфичности које утичу на структуру и карактеристике превлаке. Због тога се исти материјал превлаке може сасвим другачије понашати у примени, с обзиром на то којим је поступком нанесен на подлогу. Заштитне превлаке могу бити металне и неметалне. У овом раду се проучава утицај фактора процеса обраде супстрата за таложење на карактеристике електрохемијских превлака цинка и хрома, а на тај начин и на експлоатационе карактеристике готових производа.

## **1.4 Преглед досадашњих истраживања**

Највећи број истраживања која се односе на галванске превлаке превасходно се баве објашњењем механизма електролитичког таложења метала и изналажења нових начина заштите од штетног утицаја хемикалија, не само на непосредне раднике у погонима галванизације, него и природе, како би се осигурао одрживи економски развој. Када су у питању превлаке хрома механизам таложења превлака је изузетно сложен у односу на друге метале и још увек није довољно разјашњен. Поред електрохемијских фактора (катодне поларизације, кинетичких параметара катодне реакције, искоришћења струје и облика струјног таласа), на таложну моћ електролита и расподелу струје утичу:

- геометријски фактори (облик и димензије каде, међусобно растојање и положај електрода у кади),
- фактори подлоге, односно основног материјала (стање површине, припрема површине пре таложења превлаке итд).

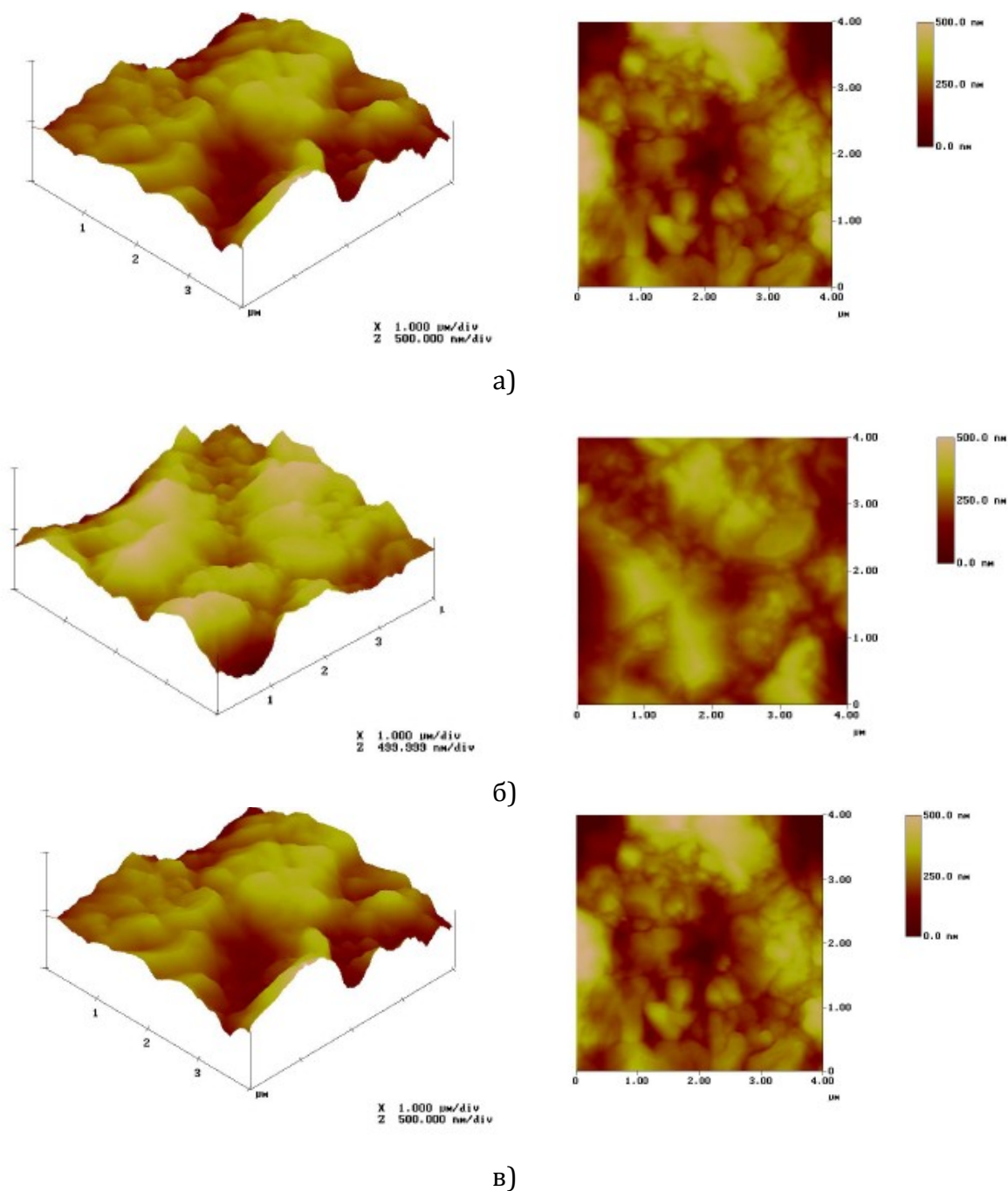
Заштитна способност превлака у знатној мери зависи од топографије површине на коју се наноси, њене компактности, као и тврдоће и присуства механичких и других примеса у основном металу - подлози за наношење [30].

Један од битних предуслова за добијање квалитетних превлака је одговарајућа припрема површине основног материјала-подлоге, а кључни процес у припреми површине за наношење галванских превлака је завршна обрада. У радовима [5, 67, 70] аутори презентују истраживања утицаја стања површине подлоге, топографије, на структуру металних превлака. Глатка и равна површина се добија процесом полирања којим се смањују неравнине, заостале на површини метала, од претходне обраде (брушење и сл.). Полирање се може обавити механички, хемијски и електрохемијски. Најбољи резултати се могу постићи комбинацијом механичког и хемијског или електрохемијског полирања, тако да се механички полирана површина подвргне додатној обради (хемијски или електрохемијски). На овај начин завршна обрада може да буде и веома кратка, а да се сјај површине метала знатно повећа. Узорци челика и бакра су подвргнути електро-хемијском полирању у одговарајућим електролитима за електрохемијско полирање. На претходно механички, а затим електрохемијски полираним узорцима мерена је храпавост површине и рефлексација светлости. Показан је утицај смањења површинске храпавости узорака који су третирани електрохемијски у односу на само механички полиране узорке. Пратећи промене односа огледалске, укупне и дифузне рефлексације потврђено је да је дошло до значајног повећања сјаја површине полиране електрохемијским путем у односу на полазну површину, како за узорке челика тако и за узорке бакра.

У раду [97] аутори анализирају површинску храпавост електрохемијски исталожених превлака сребра, као завршних превлака на алуминијуму. Ово истраживање представља класичан пример технолошког наслеђа, односно утицај топографије подлоге на карактеристике превлаке. Такође испитиван је и утицај присуства флуорида у електролиту за директно електрохемијско таложење превлака бакра на структуру завршне превлаке сребра. Показано је да се превлака сребра може успешно непосредно електрохемијски наносити на алуминијум као завршна превлака, уз претходну хемијску припрему површине и таложењем међупревлака бакра и никла.



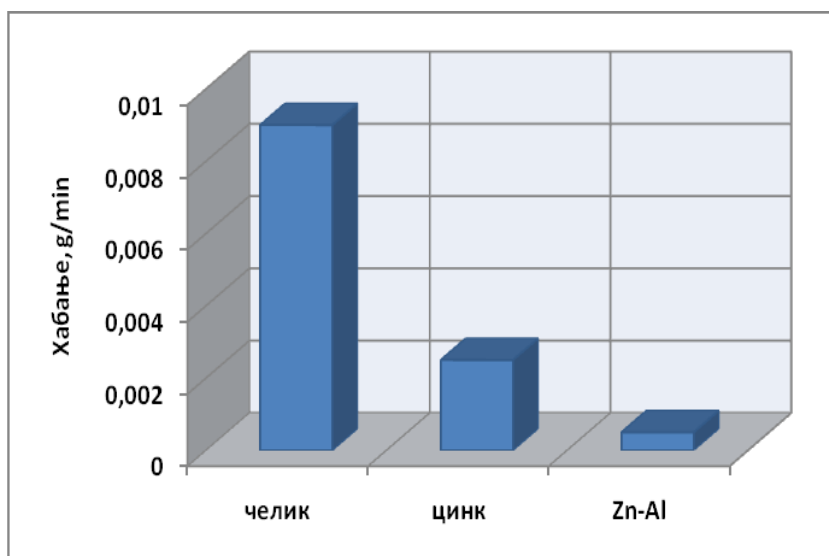
Утицај стања површине и врсте електролита на храпавост превлаке истраживан је и у раду [98]. Узорци бакра су подвргнути механичком и електро-хемијском полирању у одговарајућим електролитима за електрохемијско полирање. На овај начин су добијене површине чија је храпавост мања од  $Ra=0.400 \mu m$ . На тако претходно припремљене површине подлоге извршено је таложење превлака бакра из два купатила и то из основног електролита састава:  $240 g/dm^3 CuSO_4 \cdot 5 H_2O + 60 g/dm^3 H_2SO_4$ , и купатила са додацима за сјај.



Слика 1.9 AFM приказ превлака бакра  
а)  $15 \mu m$ ; б)  $30 \mu m$ ; в)  $50 \mu m$ ; [98]

На слици 1.9, дат је приказ површине превлака исталожених из основног електролита, дебљина  $15 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  и  $50 \mu\text{m}$ . Карактеристике добијених површина снимане су микроскопом атомских сила (AFM) и скенирајућом тунелском микроскопијом (SEM). На овај начин прецизно су приказане структурне особине које одређују да ли је метална површина огледалски сјајна или не, односно да ли је добијена топографија површине мање или више храпава. Утврђено је повећање храпавости узорака на које је таложена превлака бакра из основног сулфатног купатила у односу на механички и механички и електрохемијски припремане узорке. Такође, при таложењу превлака из купатила са додацима за сјај, дошло је до смањења храпавости површине.

Са слике 1.9, односно 3D и 2D AFM приказа површине, јасно се уочавају храпави делови посматране површине. Најмању храпавост посматраног дела површине има узорак на коме је таложена најтања превлака бакра дебљине  $\delta=0.015 \text{ mm}$ , и она износи  $Ra=0.0753 \mu\text{m}$ , за превлаку дебљине  $\delta=0.030 \text{ mm}$ ,  $Ra=0.0882 \mu\text{m}$ , а највећа храпавост је измерена код узорка са најдебљом превлаком,  $\delta=0.050 \text{ mm}$ , и она има вредност  $Ra=0.1038 \mu\text{m}$ . Добијени резултати показују тренд раста храпавости површине са продужетком времена таложења при таложењу метала из раствора простих соли, односно са порастом времена таложења и повећањем дебљине превлаке, долази до пораста храпавости, што је у складу са литературним наводима [4, 79]. Према резултатима AFM линијске анализе уочљиве су веће вредности параметара храпавости код свих узорака на које је таложена превлака бакра без додатка средства за сјај.

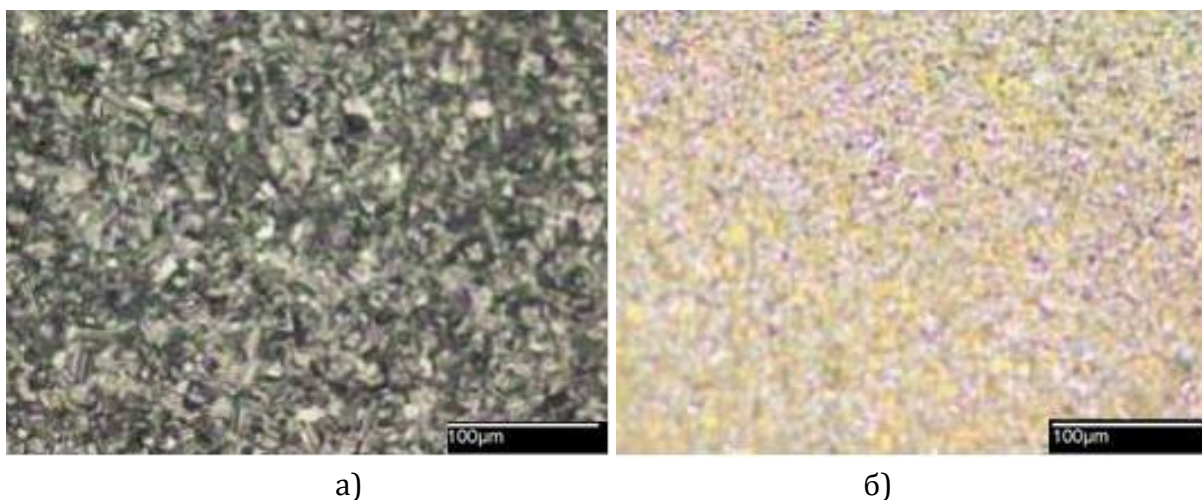


Слика 1.10 Интензитет хабања [80]

Поређењем карактеристика превлака конвенционалног Zn са превлакама легура баве се и аутори у раду [80]. Они пореде карактеристике превлаке Zn са превлаком Zn-Al легуре. Истраживања су показала да превлаке легуре Zn-Al имају бољу отпорност на корозију као и адхезиона својства. Када су у питању механичке карактеристике превлаке легуре Zn-Al имају повећану отпорност на хабање и већу микротврдоћу. График интезитета хабања за три узорка (челик, превлаке Zn и Zn-Al легуре) приказан је на слици 1.10. Узорак Zn-Al легуре има бољу отпорност на хабање што се може приписати присуству алуминијума.

У раду [90] аутори испитују карактеристике електрохемијски исталожених превлака Zn-Ni легура. Циљ испитивања је да се нађе адекватна замена за превлаке Zn и Cd. Анализа је показала да превлаке Zn-Ni легура имају знатно бољу отпорност на хабање у односу на превлаке кадмијума. Исто тако микротврдоћа Zn-Ni превлака је већа од микротврдоће превлака Cd и Zn .

У радовима [9, 12] испитиван је утицај састава раствора за таложење (хлоридног, сулфатног и пирофосфатног) и густине струје таложења на искоришћење струје приликом електрохемијског таложења Zn-Mn легура, на њихов хемијски састав, изглед превлака легура и корозиону стабилност. Легуре су таложене на челику. На основу добијених резултата показано је да: Zn-Mn легуре се таложу са већим густинама струје и мање негативним вредностима потенцијала у сулфатном раствору, у односу на таложење у хлоридном раствору.



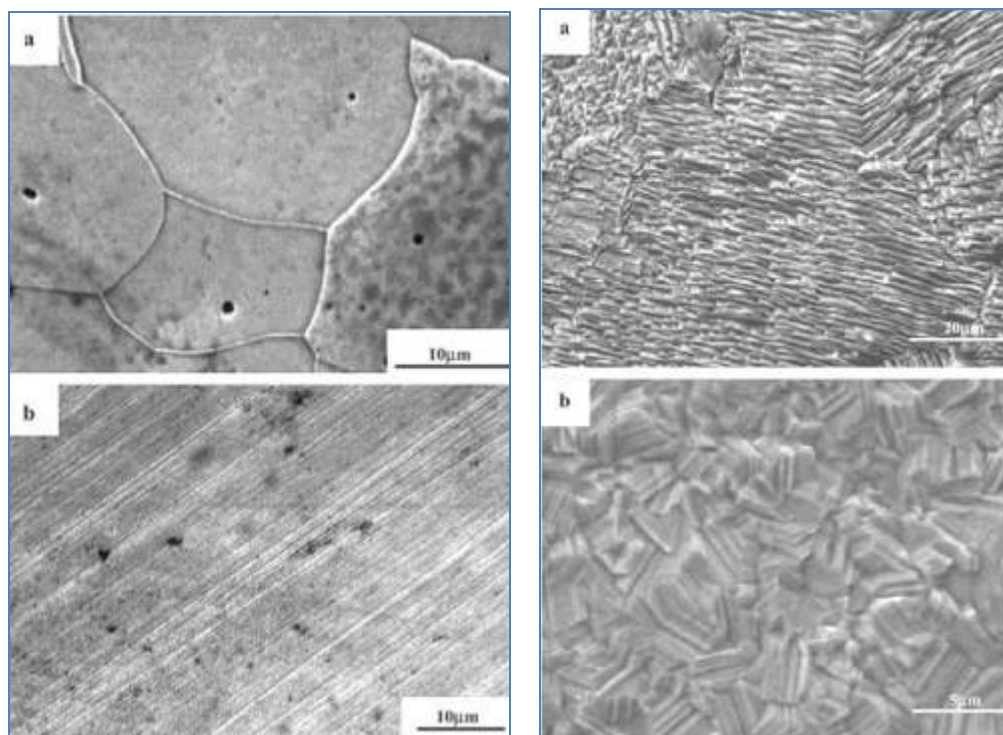
**Слика 1.11** Морфологија превлака Zn-Mn легура, добијених

таложењем густином струје од  $2 \text{ A/dm}^2$ , из:

а) хлоридног и б) сулфатног раствора (увећање 20 x) [12]

Код таложења из сулфатног раствора (слика 1.11.б) утицај густине струје таложења на изглед превлака је био више изражен, при чему су се таложењем са већим густинама струје добијале нехомогене превлаке, лоше покривености. Од свих испитиваних превлака црвени продукти корозије се прво појављују на превлакама добијеним таложењем из сулфатног раствора, густином струје од 2 A/dm<sup>2</sup>, а најотпорније су превлаке добијене таложењем из хлоридног раствора густином струје од 2 A/dm<sup>2</sup>. Испитивања у сланој комори су потврдила већу корозиону стабилност превлака добијених таложењем из хлоридног раствора.

Група аутора у раду [57] истражује корозију превлака цинка, а у раду [84] утицај припреме површине подлоге на текстуру превлаке цинка. Испитиване су превлаке исталожене на подлогама механички и електрохемијски полираним. На слици 1.12, приказана је структура превлаке цинка у зависности од подлоге на којој је исталожена.



**Слика 1.12** Морфологија подлоге и превлаке Zn [84]

*а) електрохемијски полирана подлога*

*б) механички полирана подлога*

Б. Петровић [73, 75], истражује утицај параметара реверсне струје на процес таложења превлака хрома и пореди превлаке добијене овом методом са превлакама исталоженим једносмерном струјом. Исти аутор [77], се бави и проблемом таложења превлаке хрома у саморегулишућим електролитима.

Приказан је утицај припреме површине, процесних параметара (режима струје, састава, мешања и температуре електролита) и стања анода на појаву проблема при електролитичком таложењу превлака. Приказани су технолошки поступци који се најчешће користе у пракси уз истицање важности добро изведене припреме површине за таложење превлаке хрома и њене накнадне обраде. Наглашени су трендови развоја и усавршавања процеса таложења хрома, а самим тим и побољшања својстава превлака, односно површинске заштите.

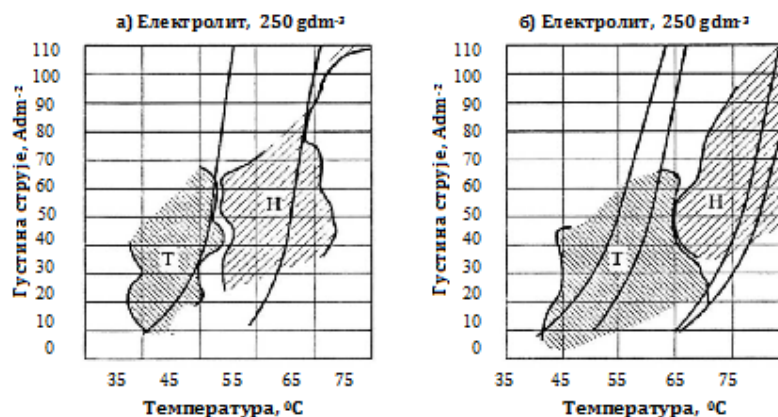
Површинска заштита унутрашњих површина цеви превлакама хрома врши се ради продужења балистичког живота цеви и њиховог лакшег одржавања [39, 40, 78]. Приказано је испитивање отпорности према ерозионом деловању барутних гасова млазница заштићених превлакама хрома. Заштита је извршена при различитим условима припреме површине, таложења превлаке и накнадне обраде. На основу резултата испитивања уочено је повећање отпорности према ерозионом деловању барутних гасова млазница заштићених хромном превлаком у односу на незаштићене млазнице.

Имајући у виду све строжије еколошке захтеве за "чистом" производњом, у раду [32, 33], аутори се баве проблематиком изналажења алтернативних процеса таложења превлака без учешћа шестовалентног хрома. Ова компаративна студија је спроведена да се систематски испитају триболошке и електрохемијске карактеристике превлака Cr–C легура исталожених једносмерном струјом у купатилу са тровалентним хромом и тврдих Cr превлака исталожених у конвенционалном купатилу (*састав купатила 250 g/l Cr O<sub>3</sub> и 2,5 g/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> са густином струје од 60 Adm<sup>-2</sup> на 55 ° C*). Превлаке су нанете на подлогу од челика S45 са подслојем бакра. Испитиване превлаке Cr–C легура имају дебљину од  $\delta=0.050$  mm. Резултати испитивања показују да превлаке Cr–C легура после термичке обраде на 200° C, имају бољу отпорност на хабање и тврдоћу од конвенционалних Cr превлака. Када је у питању електрохемијско понашање, превлака Cr–C легуре има бољу отпорност на корозију од конвенционалних Cr превлака. Дакле, електрохемијски исталожене превлаке Cr–C легура су еколошки прихватљиви кандидати да замене конвенционалне Cr превлаке.

У раду [59] испитиване су механичке и триболошке особине превлака хрома на подлози од челика OCHN<sub>3</sub>MFA, који се користи у индустрији наоружања за израду

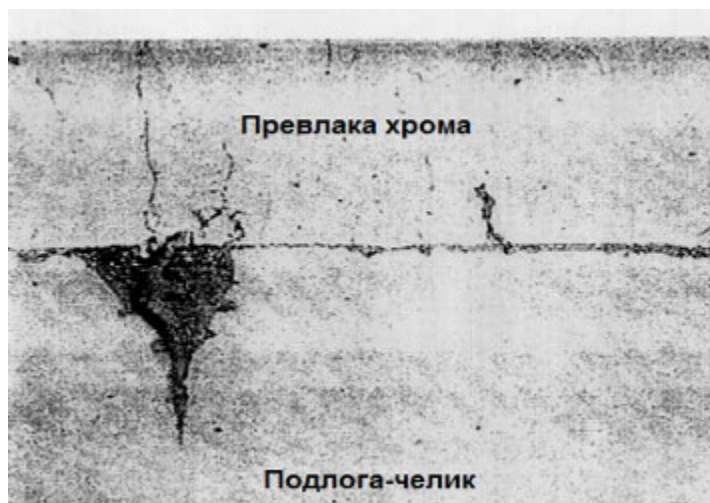
цеви. Превлаке су таложене у конвенционалном раствору ( $CrO_3 - 180 \text{ g/l}$ ), 1,2 % раствор  $H_2SO_4$ , јачина струје  $25 \text{ A/dm}^2$ , температура таложења  $70^\circ\text{C}$ , време таложења 90 минута, дебљине превлаке  $\delta=0.090 \text{ mm}$ ). Њихова дебљина, тврдоћа, отпорност на хабање и коефицијент трења су упоређени са подацима из литературе [22, 32] добијеним под другим условима.

Битна технолошка карактеристика превлака тврдог хрома је његова повећана отпорност на хабање. Један од начина продужења радног века машинских елемената је и наношење ових превлака на клизне површине. На овај начин је могуће заштитити радне површине од повећаног хабања и корозије а исто тако и извршити репарацију оштећених површина на радним елементима који су већ у процесу експлоатације. Испитивање триболошких карактеристика превлака тврдог хрома на вођицама алата који се користе у обради метала деформисањем вршено је у раду [61]. Превлаке хрома су исталожене на подлози израђеној од материјала,  $X165CrMoV12$ . Узорци су претходно термички обрађени а потом обрušени и исполирани. Дебљина исталожених превлака је  $\delta=0.030 \text{ mm}$ . Испитивање је обављено на трибометру са блок - диск контактом у условима без подмазивања са променљивим вредностима контактних параметара (нормално оптерећење и брзина клизања). Доминантан механизам хабања је абразивно хабање. Према [116] отпорност на хабање превлака хрома исталожених из хроматно-сулфатног раствора нагло расте са повећањем температуре електролита, и пролази кроз максимум на температурама од  $55$  до  $65^\circ\text{C}$ , а затим опада са даљим порастом температуре. На слици 1.13, дати су режими добијања превлака високе тврдоће и отпорности на хабање.



Слика 1.13 Дијаграм таложења превлака хрома са високом тврдоћом (Т) и отпорношћу на хабање (Н) [116]

Таложеном хрома преко основног материјала знатно се повећава отпорност према хабању и корозији, повећава се тврдоћа и термостабилност. То упућује на чињеницу да се таложеном хрома на основни материјал цеви може продужити балистички живот оружја и олакшати његово одржавање. Када је у питању хромирање цеви на оружју, како малих тако и великих калибара, истраживања су се досада углавном односила на проблем ерозије цеви у условима високих притисака и температура.



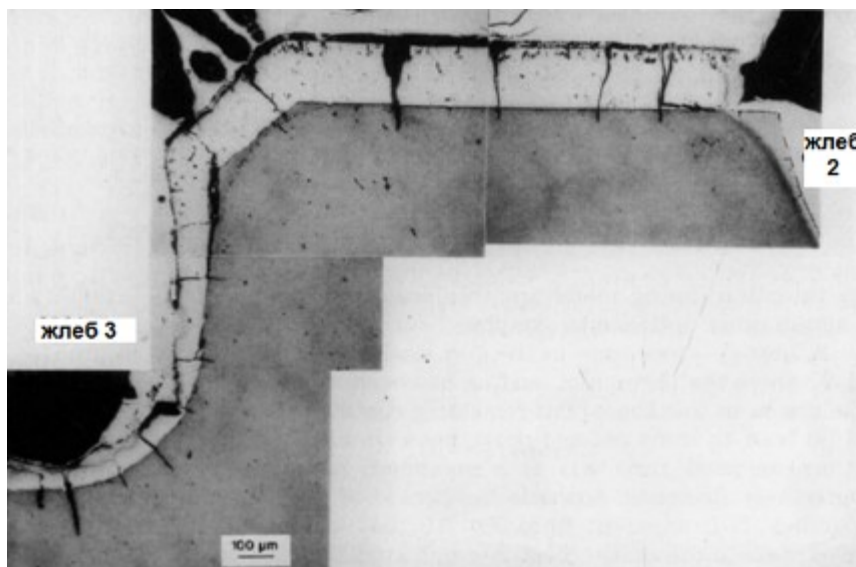
Слика 1.14 Оштећење унутрашње трасе цеви [108]

У току експлоатације оружја, чија је унутрашња траса цеви хромирана (препоручује се превлака дебљина до  $\delta=0.300\text{ mm}$ ), услед дејства барутних гасова кроз настале прскотине они продиру испод превлаке и под дејством високог притиска и температуре изазивају њено одвајање од основног материјала и испадање у облику комадића, слика 1.14 [100, 108].

На слици 1.15 [100], приказан је пресек унутрашње трасе цеви. Јасно се виде оштећења и поља и жлебова. Дебљина превлаке је  $\delta=0.200\text{ mm}$ , док је на дну жлебова  $\delta=0.075\text{ mm}$ . Пукотине у хрому су нормалне на површину и на месту жлеба 3, продиру и у основни материјал. Врели гасови још увек на овом месту нису много продрли испод превлаке и изазвали озбиљније оштећење цеви.

Код добро одабраних режима хромирања и услова експлоатације хромираних делова, отпорност према хабању делова од челика превучених превлаком хрома повећава се три до пет пута [60]. Јачину приањања превлаке за основни метал углавном одређује припрема површине на коју се превлака наноси, врста метала и примењени режим таложена. Добра механичка припрема површине а затим и

анодно активирање у електролиту обезбеђује добро приањање превлаке за подлогу. Поједини аутори у својим истраживањима сматрају да дебљина превлаке не утиче на јачину њеног приањања [113].



**Слика 1.15** Оштећење унутрашње трасе цеви [100]

У свету су веома присутна истраживања у области тврдих превлака (превлаке на бази кобалта, титана и др.) и керамичких превлака [23, 24]. Међутим примена ових превлака је и даље веома ограничена на мали број производа. Развој савремене мерне опреме и примена нових сазнања у области наношења заштитних превлака (на првом месту галванских превлака хрома) данас поново актуелизује истраживања заштитних превлака хрома, никла, цинка, итд. Истраживања утицаја тврдоће површине подлоге на танке тврде превлаке презентована су у радовима [105, 106, 115]. Проведена истраживања су доказала значајан утицај тврдоће подлоге на трајност танких DLC и CrN тврдих превлака. Анализа добијених резултата, као и симулације модела хабања трибосистема превлака-основни материјал показале су и доказале да заједно с тврдоћом подлоге изузетну важност за трајност трибосистема има и дебљина превлаке. Комбинацијом њихових вредности може се утицати на место и распоред највећих напрезања у узорку, а тиме деловати и на век трајања трибосистема. Међутим још увек недовољно познавање утицаја различитих фактора, нпр. већег броја слојева превлака, нехомогености и микроструктурних дефеката на месту споја превлаке и основног материјала, представља ограничења због којих добивени модели не могу у потпуности заменити експериментална испитивања.



Предмет дисертације је истраживање утицаја технолошких параметара обраде на карактеристике заштитних превлака. Испитивања обухватају анализу утицаја начина израде делова и формирања заштитних галванских превлака хрома и цинка на јачину приањања, микротврдоћу превлака, триболошка својства и отпорност превлака на корозију. Већина досадашњих истраживања била је усмерена на карактеризацију превлака и њихове везе са основним материјалом, док су подаци о утицају технолошког наслеђа, превасходно топографије и тврдоће подлоге тешко доступни или не постоје. То указује на комплексност тог подручја и на непознавање утицајних фактора на својства превлака. То је уједно и подручје на које је ово истраживање усмерено. Циљ му је да се на основу испитивања различитих група репрезентативних узорака добију информације о утицају појединих фактора на трајност система основни материјал-превлака.

## **1.5 Циљ и сврха истраживања**

Циљ докторске дисертације је да се утврди утицај фактора процеса ообраде на карактеристике заштитних превлака на деловима наоружања, да се дефинише њихова међузависност и развије методологија испитивања заштитних превлака применом савремене мерне опреме. Циљ би се остварио кроз следећи систем парцијалних циљева:

- *дефинисање параметара фактора процеса обраде који су релевантни при формирању површина делова на које се наносе заштитне металне превлаке,*
- *експериментална испитивања утицаја параметара фактора процеса обраде на карактеристике превлака,*
- *развој теоријског модела утицаја фактора процеса претходне обраде на механичке, триболошке и друге карактеристике заштитних металних превлака.*

## **1.6 Основне хипотезе рада**

Заштитна функција превлака остварује се првенствено одвајањем материјала подлоге од околине, па оне саме морају бити довољно постојане и трајне у различитим условима експлоатације. Да би нека превлака била постојана потребно је осигурати њену хомогеност, потребну дебљину и приоњивост.

Основне хипотезе од којих се полази при раду су следеће:

- *параметри фактора процеса претходне и завршне обраде површине дела имају битан утицај на карактеристике превлака и готовог производа,*
- *избором параметара процеса таложења превлака може се значајно утицати на карактеристике превлака,*
- *између параметара фактора процеса обраде подлоге за таложење превлака и карактеристика превлака могу се успоставити зависности у циљу оптимизације процеса обраде и добијања максималних перформанси површинских слојева готовог производа.*

## **1.7 Очекивани научни допринос истраживања**

Реализацијом теоријских анализа и спроведених експерименталних испитивања у оквиру дисертације, очекују се следећи резултати:

- *креирање модела за експериментална истраживања и одређивања карактеристика галванских превлака применом савремене опреме (као што су триболошка испитивања, "scratch test", микроскопија атомских сила, итд.,*
- *дефинисање утицаја карактеристика површинских слојева и параметара процеса таложења превлака на карактеристике заштитних превлака,*
- *формирање зависности између параметара фактора процеса обраде и карактеристика површинских слојева на које се наносе превлаке.*

## **1.8 Преглед садржаја дисертације**

На основу унапред дефинисаних хипотеза, задатака и циљева реализована су испитивања, чији су резултати представљени кроз неколико поглавља.

Преглед утицаја технологија инжењерства површина на квалитет готових производа приказан је у првом поглављу. Поштравање конструкционих захтева са аспекта повећања радног века производа, а самим тим и његове цене, иницирало је развој и примену како нових материјала тако и начина побољшавања карактеристика постојећих. Наношење галванских превлаке на основни материјал је само један од начина да се карактеристике површине

основног материјала промене у циљу побољшања: отпорности према корозији, отпорности на хабање, веће или мање електричне проводљивости, боље лемљивости или бољег естетског изгледа. Дат је приказ примене галванских превлака на деловима оружја фабрике Застава оружје АД у Крагујевцу као и преглед истраживања у области галванских превлака цинка и хрома.

У другом поглављу дате су основне информације о технолошком наслеђу и његовом утицају на радни век готових производа. Површински слојеви обрађених површина добијених различитим врстама и режимима обраде могу имати различит хемијски састав и структуру, што се тек у периоду експлоатације може испољити. Односно све карактеристике површинских-контактних слојева формирају се као резултат деловања различитих фактора обраде кроз све операције закључно са завршном. Основни задатак се састоји у одређивању утицаја стања површине подлоге за таложeње на карактеристике превлака. Извршена је свеобухватна анализа фактора који утичу на формирање својстава површина.

У поглављу три је дат начин израде узорака за испитивање. Овај део истраживања је подељен у два дела. Први део садржи израду узорака за таложeње превлака и анализу стања површина, односно одређивање топографије и тврдоће узорака. Претходна обрада узорака обављена је глодањем, после чега је извршена термичка обрада на различите тврдоће. Завршна обрада површина за таложeње превлака обављена је са више технологија израде, брушењем, пескарењем, полирањем. Други део истраживања обухвата таложeње превлака цинка и хрома и њихову припрему за даља експериментална истраживања.

У поглављу четири приказана је испитна и мерна опрема коришћена приликом испитивања. Дате су техничке карактеристике опреме, принцип рада, и методологија примењена за прикупљање и анализу резултата испитивања.

Резултати експерименталних карактеристика исталожених превлака цинка и хрома дати су у поглављу пет. У циљу лакше анализе добијених резултата подаци о превлакама су приказани одвојено. Спољни изглед превлака оцењиван је визуелно, а морфологија методом оптичке микроскопије и AFM методом. Дебљина превлака одређивана је магнетном методом. Приањање превлака за основни метал одређивано је стандардизованим методама, методом загревања и "scratsh"

тестом. Испитивање микротврдоће вршено је по методи Викерс-а  $HV_{0.1}$ . Триболошка испитивања су извршена на трибометру TP-95 са "block-on-disk" контактном геометријом. На основу вредности ширине трагова хабања израчунате су и запремине похабаног материјала, као и интензитет хабања.

Развој експертног система у области галванских превлака приказан је у шестом поглављу.

У поглављу седам је извршено је сумирање информација изложених у претходним поглављима. На основу спроведених експерименталних испитивања и анализе добијених резултата изведени су одређени закључци о утицају фактора процеса на карактеризацију галванских превлака цинка и хрома. Дате су и препоруке будућих праваца истраживања утицаја технолошког наслеђа на карактеристике галванских превлака и развоја експертног система у области галванских превлака.

## **2. ТЕХНОЛОШКО НАСЛЕЂЕ**

Високи захтеви савременог машинства за квалитет и поузданост машинских елемената, суштински су изменили прилаз у њиховом конструисању и технологији израде. Већина појава насталих у процесу израде елемената значајно утиче на процесе губитка радне способности производа у процесу експлоатације. На основу тога проистиче и потреба за обезбеђењем неопходног квалитета и поузданости рада машина и уређаја кроз анализу свих појава које прате процес израде и експлоатације. Многе појаве настале у претходној и завршној обради машинских елемената, значајно утичу на процес губитка радне способности машине у експлоатационим условима. Значи да је за обезбеђење високог квалитета и поузданости једног производа неопходна свестрана анализа свих појава које прате процес израде и експлоатације његових елемената, склопова и механизма. Утицај претходне обраде на развој процеса хабања и радни век финалних производа (машина, уређаја,...), је мало анализиран. Ове појаве су у литератури познате као технолошко и експлоатационо наслеђе и њихово озбиљније проучавање почело је у другој половини прошлог века [10, 47, 85, 86].

Разлози који доводе до промене параметара машина и уређаја у току експлоатације су различити и везани су углавном за процесе хабања, измене зазора, старење материјала, промене особина материјала и др. Процес губитка радне способности зависи у великој мери од свих појава које настају у процесу израде елемената, па отуда и захтев за анализу истих. На процес губитка радне способности утиче низ конструктивних, технолошких и експлоатационих фактора. Модели ових процеса могу бити развијени на бази резултата изучавања зависности експлоатационих особина елемената и технологије израде као и

режима њихове експлоатације. Истраживања везана за обезбеђивање одговарајућих услова одвијања технолошких процеса и добијања потребних карактеристика машинских елемената, била су дуго ограничена на поједине операције које су посматране парцијално, изоловано од осталих.

Физичко-хемијске и механичке карактеристике контактних слојева у трибо-механичким системима зависе од услова под којима су настале контактне површине. Да би се добиле објективне законитости процеса потребно је свестраније изучавање излазних карактеристика технолошких процеса (тачност израде, физичко-механичке карактеристике и др.) узимајући при томе у обзир и утицај технолошког наслеђа. Из тих разлога се све већа пажња посвећује утицају претходних обрада елемената на експлоатациона својства истих као и њиховој међусобној зависности. Односно све операције једног технолошког процеса обраде не треба посматрати изоловано, с обзиром да се коначне особине обрађених површина формирају под дејством читавог комплекса операција које се на њој изводе [48, 96].

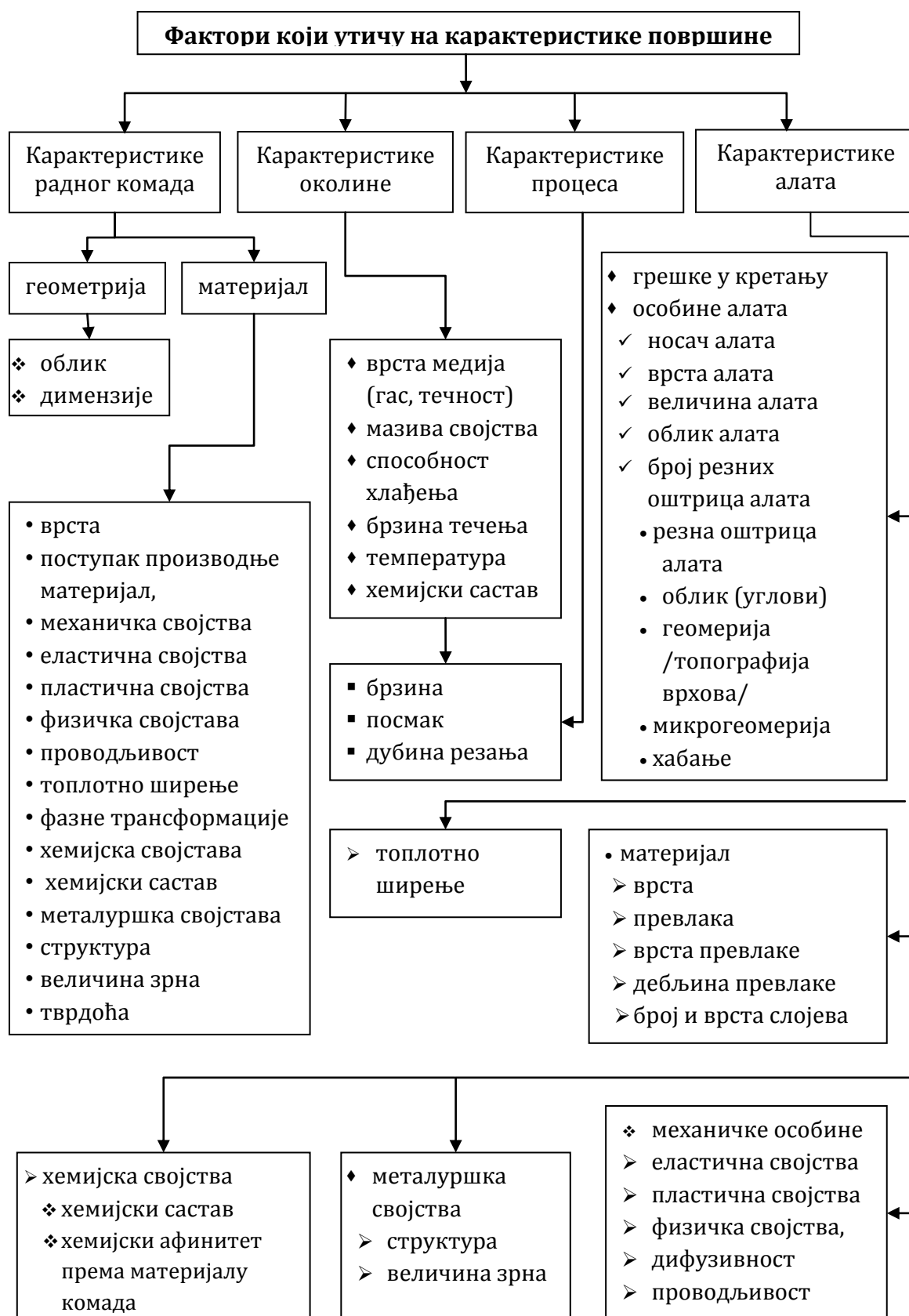
Да би се обезбедили тражени параметри квалитета контактних површина а тиме и њихове експлоатационе особине, потребно је створити одређене услове за управљање одвијања целог технолошког процеса и свим појавама у њему.

Већина појава које настају у процесу израде елемената, односно обраде њихових површина значајно утичу на процес губитка радне способности целог уређаја, машине или конструкције у условима експлоатације. Отуда и захтев за анализу свих појава које прате цео циклус процеса израде и експлоатације како би могао да буде обезбеђен потребан ниво квалитета као крајњи циљ.

Стање површине је битно због:

- различитости њених карактеристика од карактеристика основног материјала,
- на површини долази до трења, хабања и подмазивања,
- од обраде површине зависи понашање дела у експлоатацији,
- површине се обликују технолошким поступцима те од потребе за добијање површине одређених карактеристика зависи које се производне операције могу користити.

На слици 2.1 дати су фактори који утичу на карактеристике површине.



Слика 2.1 Фактори који утичу на карактеристике површине [51]

Из тих разлога се све већа пажња посвећује и операцијама које претходе завршној као и њиховом утицају на експлоатационе карактеристике, при чему се тежи успостављању корелационих веза између показатеља квалитета производа и услова у којима се контактни слојеви образују.

Под појмом технолошког наслеђа подразумевају се појаве преношења својстава обрађених површина од претходних на наредне операције и коначне особине површинског слоја које се касније одражавају на експлоатационе особине елемената или конструкција [2].

Као најбољи пример који илуструје појаву технолошког наслеђа може да послужи копирање геометријских грешака при обради делова. Ако је, радни предмет био овалан у претходној операцији опет ће се појавити овалност само мање величине. При раду кроз више операција, форма и димензије радних предмета постају све тачнији али се завршне грешке у извесном степену копирају кроз све операције. Копирање геометријских грешака се објашњава елестичним деформацијама у обрадном систему као и услед топлотних појава које изазивају заостала унутрашња напрезања која касније доводе до одређених деформација.

Површински слојеви обрађених површина добијених различитим врстама и режимима обраде могу имати различит хемијски састав и структуру, што се тек у периоду експлоатације може испољити. Односно све карактеристике површинских-контактних слојева формирају се као резултат деловања различитих фактора обраде кроз све операције закључно са завршном [21, 94].

Основни параметри машинских елемената, наслеђени у току технолошког процеса, могу се поделити у две основне групе: везане за материјал и микро и макроегеометријске показатеље обрађених површина.

У прву групу спадају параметри који карактеришу хемијски састав, структуру и стање напрезања материјала машинских елемената, структуру површинских слојева, површинску енергију и др. Друга група карактерише микро и макро геометрију обрађених површина (храпавост, овалност, валовитост и др.).

Наслеђе обеју група параметара не испољава се увек у истим размерама и нема увек исти значај а и природа наслеђа није иста. Када посматрамо цео ланац технолошких операција које се изводе при формирању неке површине, њихов



утицај на коначне карактеристике је различит. Степен утицаја сваког технолошког фактора није исти. Док се утицај појединих простире до последње операције у ланцу, утицај других се гаси много раније. Осим тога, има фактора који делују само у домену своје операције док се на наредне не преносе. Тако се може рећи, да поједине операције технолошког процеса представљају извесне "технолошке баријере" за наследне особине. Једни фактори су у стању да те "баријере" савладају док други не могу, па је њихов утицај на коначне особине одсутан.

Присутне "баријере" код појединих операција обраде често могу и суштински да мењају дејство негативних фактора технолошког наслеђа. Очити примери који указују на технолошке баријере су, операције термичке обраде, као и поједине операције пластичног деформисања.

Структура и дефекти метала различите врсте, настали у металуршком процесу, могу проћи кроз целокупан технолошки процес израде и показати утицај на квалитет готовог производа. Тако при изради делова технологијом топлог деформисања структура делова суштински зависи од температурног интервала при коме се обрада врши. Ако је при томе формирана неповољна структура, елементи ће имати слабије физичко-механичке карактеристике и кратак век, без обзира на високу тачност завршне механичке обраде.

Наслеђена структура метала испољава се у сачуваној форми и кристалографској оријентацији структурних елемената, после директног (при хлађењу) и обратног (при загревању) полиморфног претварања. При обратном претварању могу се успоставити контуре почетних кристала оријентације решетке кристала, положај дислокација и дефекта при слагању, а у низу случајева и макроскопска форма производа, ако се при његовом пластичном деформисању образује мартензит. Наслеђене дислокације добијене као резултат пластичног деформисања челика, могу бити коришћене за повећање његове чврстоће термомеханичком обрадом [88].

Физичко-механичке карактеристике и структура површинског слоја у великој мери зависи од врсте и режима претходне обраде. Под утицајем сила резања и температурних деловања у процесу претходних обрада, могу настати структурне измене слоја на дубини која прелази дубину додатка за завршну обраду.

У зависности од методе обраде, некада је утицај претходне обраде на хабање површина у контакту већи од утицаја завршне обраде.

Као резултат прерасподеле заосталих напрезања, фазних и структурних промена, машински елементи у процесу експлоатације могу изменити своју геометријску форму. И друге сличне измене, условљене особеностима технолошког процеса израде машинских елемената, имају наследни карактер. Неравномерност додатка за брушење, при обради условљава повишено загревање у појединим зонама, што доводи до настајања локалних напрезања. Овако настала напрезања, током процеса експлоатације изазивају еластичне деформације које се манифестују променом геометријске форме. Радна способност и век трајања машинских елемената и склопова, у великој мери зависе од храпавости и валовитости радних површина.

Параметри храпавости ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  и др.) и валовитости утичу на контактну чврстоћу, расподелу притисака у зони контакта, услове подмазивања спрегнутих површина, а самим тим и на радну способност и век трајања машинских елемената. Ако се посматра отпорност на хабање елемената за различите параметре храпавости површине увиђа се да ће постојати неки оптимални параметри при којима ће хабање бити минимално, без обзира што су за различите услове рада они различити. Храпавост и њени параметри имају наследни карактер, јер свакој методи обраде одговарају различите вредности храпавости [96].

Из ових разматрања могуће је закључити да се квалитет машинских елемената карактерише параметрима храпавости, величином геометријске грешке и вредностима различитих физичко-механичких параметара материјала који имају наследну природу.

За разлику од технолошког наслеђа које се испољава у сваком технолошком процесу и изражава се међусобном зависношћу геометријских и физичко-механичких параметара површинских слојева формираних кроз претходне и завршне операције, експлоатационо наслеђе се одражава везом између параметара који карактеришу процес губитка радне способности производа, век трајања производа и условима оптерећења.

У циљу обезбеђивања оптималне трајности и поузданости рада машинских елемената потребно је да се формирају и одговарајуће геометријске и физичко-механичке карактеристике обрађених површина. На експлоатационе карактерис-

тике елемената основни утицај испољавају тачност израде, храпавост радних-контактних површина, врста материјала и његова својства [2, 42].

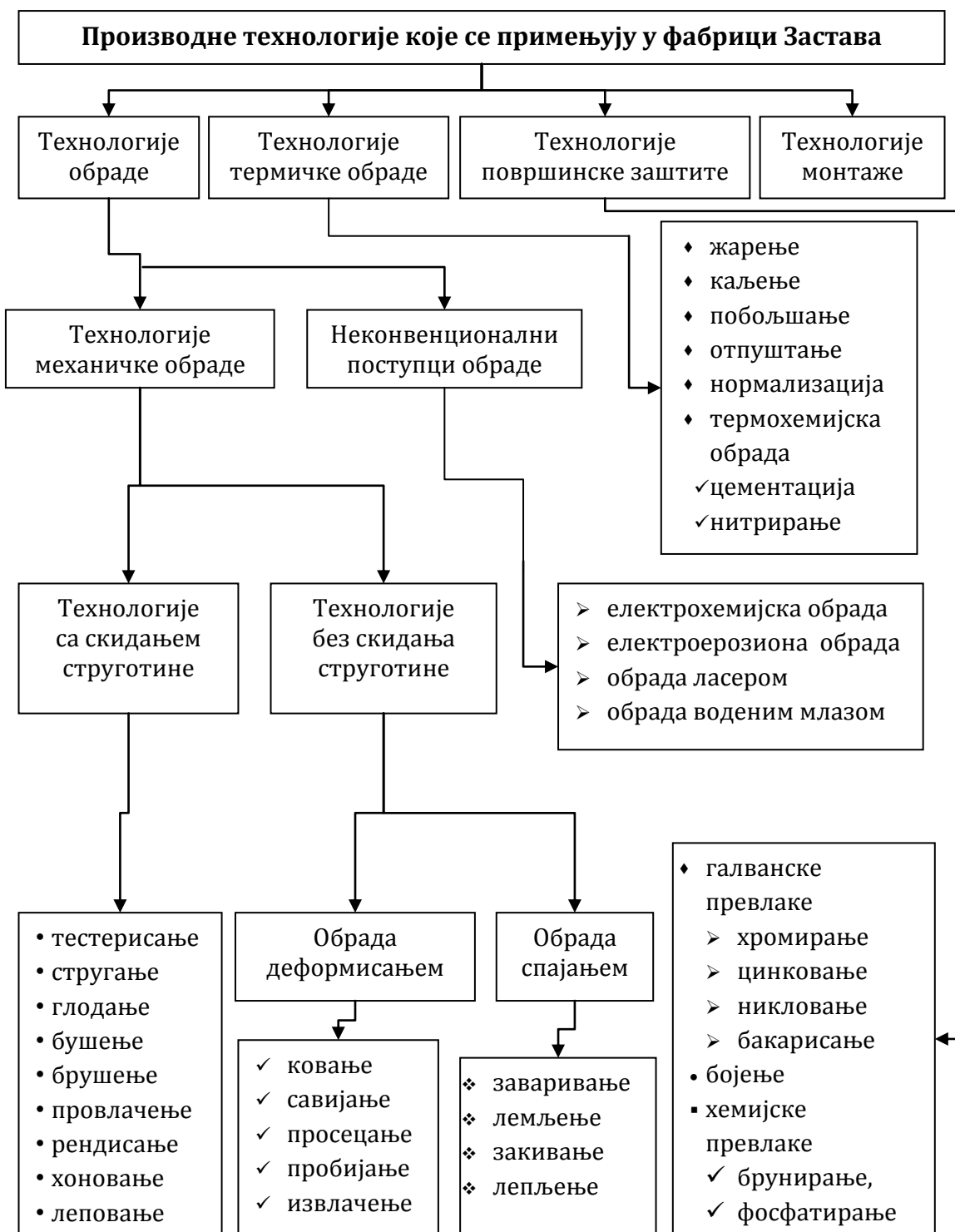
Процес експлоатације производа (алатне машине, аутомобили, оружје, и др. ) може се вршити у различитим условима: радне средине (влажност, запрљаност, температура и др.), режима рада (оптерећење, брзина, хлађење и др.), опслуживања (периодичност и квалитет превентивног одржавања, ремонта и др.). У зависности од услова експлоатације производа, мењаће се и почетна структура материјала машинских елемената, њихова микро и макрогеометрија, крутост спојева и покретних спрега, као и кинематика и динамика склопова и механизма.

Између технолошког и експлоатацијског наслеђа може да се успостави јасно одређена веза чије дефинисање представља један од задатака при истраживању ових проблема, односно при истраживању зависности експлоатационих карактеристика и метода и режима обраде површина. При томе треба увек имати у виду да деловање технолошких фактора није само у процесу израде где се јављају већ и касније при експлоатацији готових производа [46, 47, 48].

У производном програму фабрике Застава оружје у Крагујевцу заступљена је већина данас познатих технологија из области прераде метала. Преглед технологија које се користе за израду оружја у овој фабрици приказан је на слици 2.2.

Као резултат примене технологија механичке обраде добијају се обрађене површине измењене структуре у односу на основни материјал. Уз структурне промене долази и до измене физичко-механичких и хемијских својстава материјала. Карактеристике површинског слоја су резултат дејства сложеног и међусобно условљеног комплекса кинематских и физичкохемијских фактора, међу којима одлучујућу улогу има пластично деформисање, отврдњавање и загревање радног предмета. Један од начина да се поправи квалитет површинских слојева делова, а на тај начин и готових производа је и њихово превлачење различитим превлакама. У индустрији наоружања највише су заступљене галванске превлаке цинка и хрома. Када су у питању галванске превлаке, процес њиховог таложења траје доста дуго, што као последицу има доста изражена унутрашња напрезања, поре, дефекте, укључке и друго [30]. Како ће се ове појаве као и стање површине на коју се таложе превлаке одразити на њихове функционалне карактеристике одговор нам даје теорија наслеђа.

Проблем одређивања утицаја технологије израде на карактеристике коначног производа је веома комплексан јер у себи садржи утицај стања површине дела пре обраде (заостали напони, валовитост, храпавост итд.), утицај параметара процеса обраде резањем (режими обраде, итд.), и утицај технологије nanoшења превлака.



Слика 2.2 Преглед производних технологија у фабрици Застава оружје

### 3. ПРИПРЕМА УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ

Припрема узорака за испитивање је обављена из два дела. Први део садржи израду узорака призматичног облика димензија 15 x 10 x 6.3 mm, према стандарду ASTM G 77. Претходна обрада узорака обављена је глодањем, после чега је извршена термичка обрада на различите тврдоће. Завршна обрада површина за таложeње превлака извршена је на више начина: брушењем, полирањем, пескарењем и др.

Други део израде узорака обухвата таложeње превлака цинка и хрома на припремљене блокове према усвојеном плану експеримента.

#### 3.1 Израда блокова за таложeње превлака

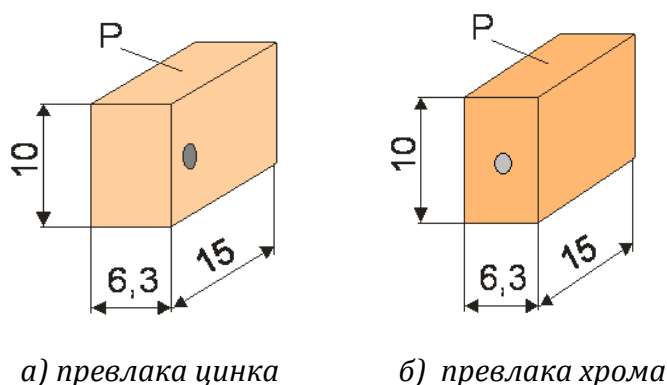
Као материјал за наношење превлака одабран је челик *Ћ5730*, према ГОСТ-у *30ХН2ФА1*. Пошто се ради о специјалном војном челику не постоји упоредна ознака према другим стандардима. Одабрани челик се користи за израду цеви стрељачког оружја. Хемијски састав основног материјала који је одабран као подлога за таложeње превлака приказан је у табели 3.1.

**Табела 3.1** Хемијски састав подлоге за таложeње превлака, *Ћ5730*

Хемијски састав, %								
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cu</i>
0,27- 0,34	0,30 - 0,60	0,17 - 0,37	2,0 -2,4	0,60 - 0,90	0,20 - 0,30	0,10 - 0,18	max 0,025	max 0,25

Узорци за наношење превлака су блокови димензија 15 x 10 x 6.3 mm, према стандарду ASTM G 77 (слика 3.1). Претходна обрада узорака обављена је глодањем, после чега је извршена термичка обрада на различите тврдоће.

Завршна обрада узорка за таложење превлака цинка и хрома вршена је на више начина, брушењем са више режима, полирањем, глодањем и пескарењем [55]. На овај начин су добијене различите карактеристике површинског слоја и различите топографије површина. У табели 3.2, дати су начини завршне обраде свих узорка. Наношење превлака на узорке за испитивање извршено је према усвојеном плану експеримента, табела 3.3 и табела 3.5.

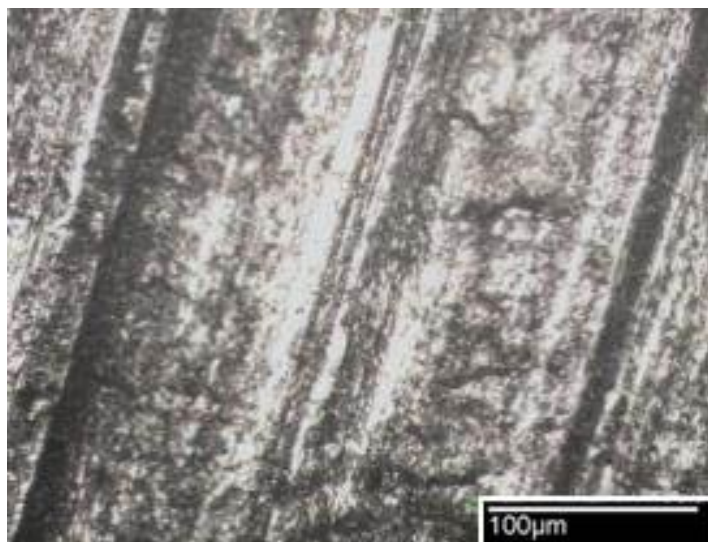


Слика 3.1 Блокови за наношење превлака

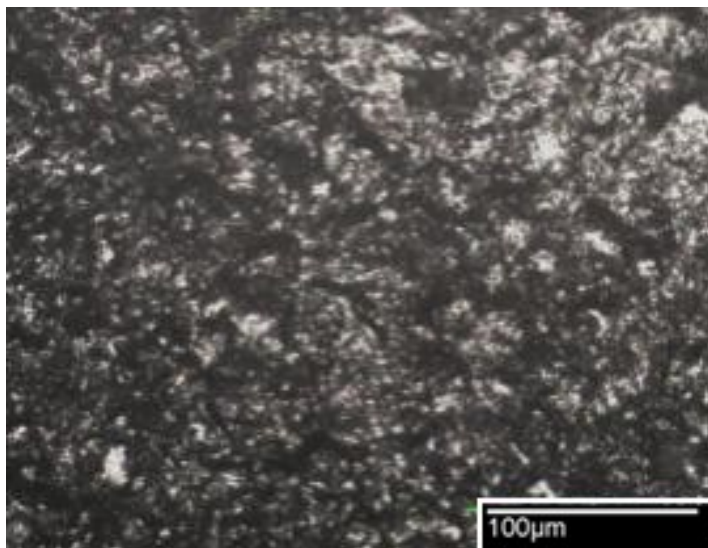
Табела 3.2 Технологије израде узорка

	Врста обраде	Машина	Алат	Режим обраде
1.	Глодање	Вертикална глодалица	Глодало SRPS K.D2.090-12N	$n=500 \text{ o/min}$ , $s=60 \text{ mm/min}$
2.	Пескарење	Ручна пескара TP-111	Електрокорунд 0.123 - 0.250	$P=5 \text{ bar}$ , $T=5 \text{ min}$ .
3.	Брушење грубо	Брусилаца за равно брушење "КИКИНДА"	Тоцило 300x50x76 SRPS K.F1.020 A1060M6B	$A_3$ $A_4$
4.	Брушење фино	Брусилаца за равно брушење "КИКИНДА"	Тоцило 300x50x76 SRPS K.F1.020 A1060M6B	$A_1$ $A_2$
5.	Полирање	Машина за полирање "ЗАСТАВА"	Брусни папир: P 320, P 600; Паста са дијамантским честицама величине 3 $\mu\text{m}$	$n=150 \text{ o/min}$ , $T=5 \text{ min}$ .
6.	<b>Режим обраде:</b> $A_1$ ( $n=2800 \text{ o/min}$ , додатак за брушење 0.03, брзина стола: 15 ход/мин) $A_2$ ( $n=2800 \text{ o/min}$ , додатак за брушење 0.03, брзина стола: 30 ход/мин) $A_3$ ( $n=1400 \text{ o/min}$ , додатак за брушење 0.03, брзина стола: 30 ход/мин ) $A_4$ ( $n=1400 \text{ o/min}$ , додатак за брушење 0.03, брзина стола: 15 ход/мин )			

На сликама од 3.2 до 3.11, приказано је неколико узорка за таложење превлака цинка и хрома. Површине су добијене различитим поступцима обраде.



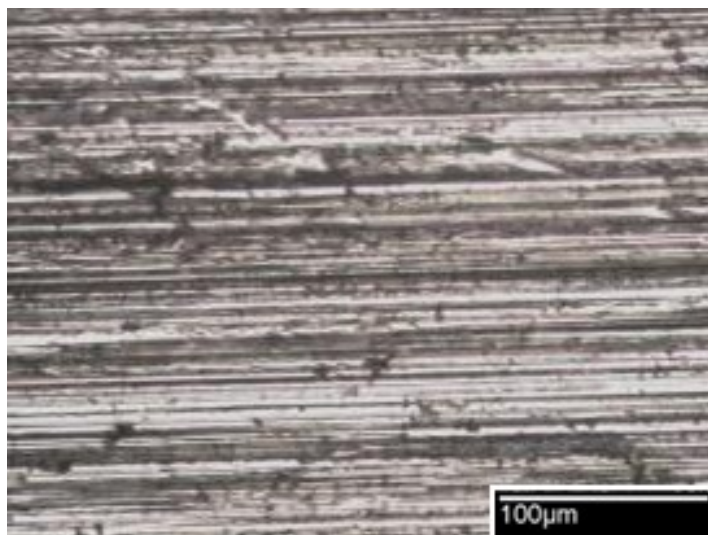
**Слика 3.2** Узорак број 22, завршна обрада подлоге, глодање



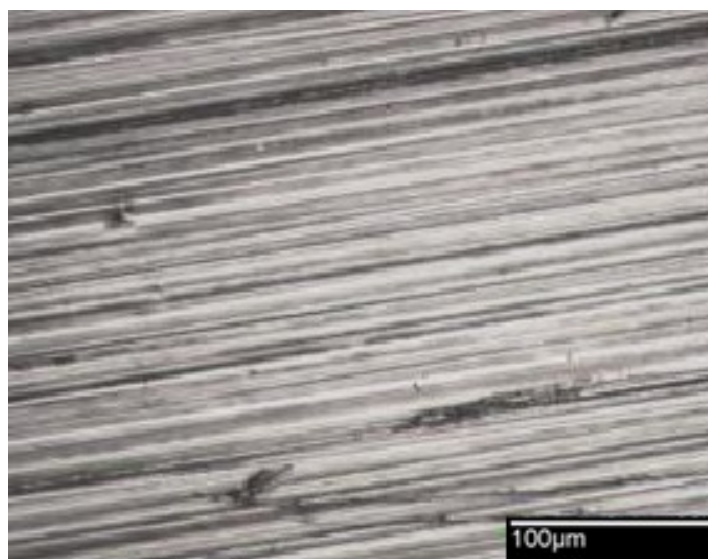
**Слика 3.3** Узорак број 38, завршна обрада подлоге, пескарење



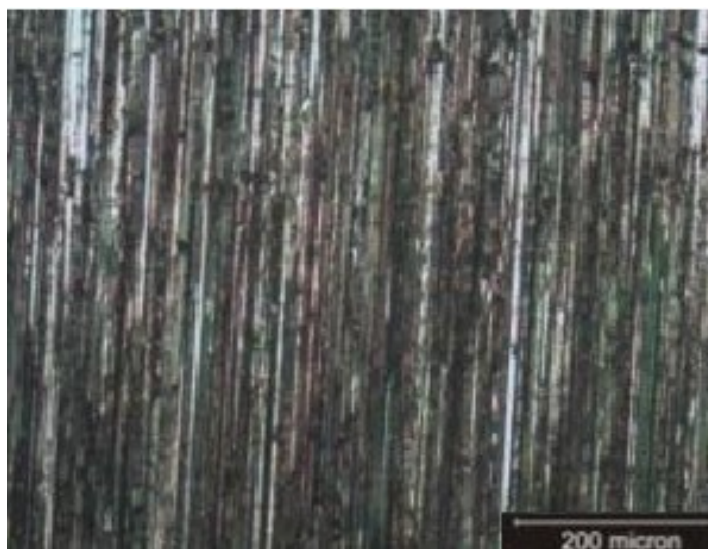
**Слика 3.4** Узорак број 7, завршна обрада подлоге, грубо брушење



**Слика 3.5** Узорак број 1, завршна обрада подлоге, фино брушење

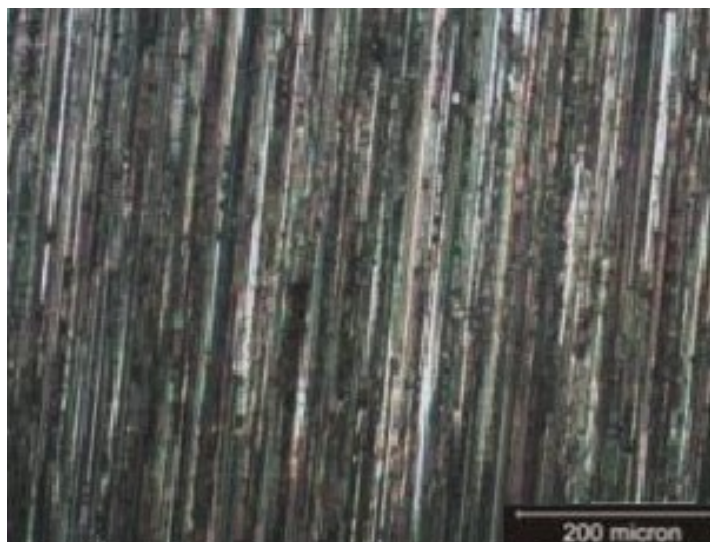


**Слика 3.6** Узорак број 17, завршна обрада подлоге, полирање



**Слика 3.7** Узорак број 112, завршна обрада подлоге, брушење-режим A<sub>4</sub>

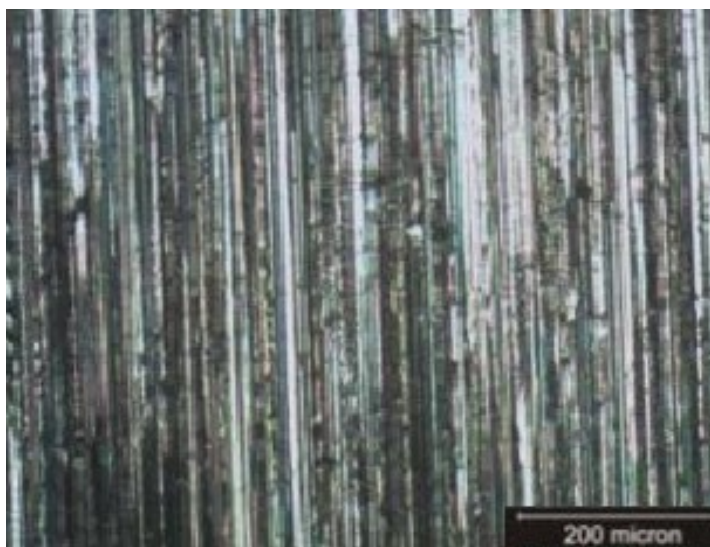




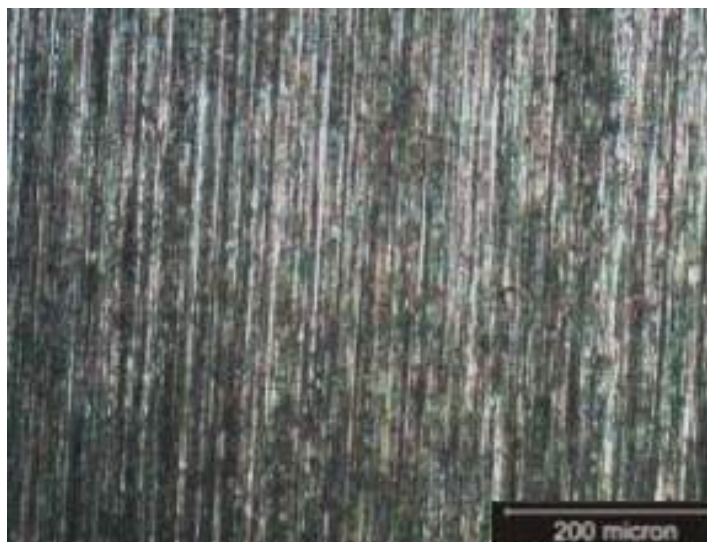
**Слика 3.8** Узорак број 92, завршна обрада подлоге, брушење-режим  $A_3$



**Слика 3.9** Узорак број 76, завршна обрада подлоге брушење-режим  $A_2$



**Слика 3.10** Узорак број 56, завршна обрада подлоге, брушење-режим  $A_1$



*Слика 3.11 Узорак број 65, завршна обрада подлоге, полирање*

Мерење тврдоће узорака извршено је у РЈ Контрола квалитета, фабрике Застава оружје АД, Крагујевац. Топографија узорака одређена је у Лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. Подаци о стању површине узорака припремљених за таложење превлаке цинка дати су у табели 5.1, и табели 5.8 за узорке припремљене за таложење превлаке хрома.

### **3.2 Наношење превлака**

Наношење галванских превлака је извршено у погону за галванизацију, фабрике Застава оружје АД, Крагујевац, слика 3.12.



*Слика 3.12 Погон галванизације*

### 3.2.1 Превлаке цинка

Превлаке цинка су таложене у програмираном режиму рада једносмерном струјом, по задатом плану експеримента. У току процеса талочења, параметри једносмерне струје су контролисани и регулисани у задатим границама.

Наношење превлака цинка је вршено на следећи начин:

- алкално безцијанидно одмашћивање са индустријским детерџентом,
- испирање у проточној води,
- декапирање у разређеној хлороводоничној киселини у односу 1:1,
- испирање водом,
- електро-хемијско наношење превлаке цинка,
- собна температура наношења превлаке,
- густина струје талочења  $2 \text{ A/dm}^2$ ,
- просветљавање у 2% раствору  $\text{HNO}_3$ , у трајању од 50 секунди,
- испирање у проточној води,
- сушење топлим ваздухом

Талочење превлака цинка обављено је у алкалном безцијанидном електролиту следеће концентрације:

- цинк оксид  $12.5 \text{ g/dm}^3$ , препоручено ( $10 - 19 \text{ g/dm}^3$ ),
- натријум оксид  $120 \text{ g/dm}^3$ , препоручено ( $110 - 150 \text{ g/dm}^3$ ).

**Табела 3.3** План експеримента за талочење превлака цинка

Врста превлаке	Стање површине		Дебљина превлаке, $\mu\text{m}$	
	Врста обраде	Тврдоћа, HRC	$\delta_1=10-15$	$\delta_2=20-25$
ЦИНК	Глодање	$\leq 20$	x	x
		25 - 30	x	
	Пескарење	$\leq 20$	x	
		25 - 30	x	x
		40 - 45	x	x
	Брушење - грубо	$\leq 20$		x
		25 - 30	x	x
		40 - 45	x	x
	Брушење - фино	$\leq 20$	x	x
		25 - 30	x	x
		40 - 45	x	x
	Полирање	$\leq 20$	x	
		25 - 30	x	x
		40 - 45	x	

### 3.2.2 Превлаке хрома

Превлаке хрома су таложене у програмираном режиму рада једносмерном струјом, по задатом плану експеримента (табела 3.4). У току процеса таложења, параметри једносмерне струје су контролисани и регулисани у задатим границама. Коришћене аноде су направљене од олова са 10 % антимоана.

**Табела 3.4** Параметри програмираног таложења превлака хрома

	Параметри електролизе	Програм таложења превлака хрома			
		1	2	3	4
1	Густина струје таложења, $A\ dm^{-2}$	30	30	60	60
2	Струја таложења, $A$	2	2	3.8	3.8
3	Време таложења, $h$	3	6	3	6
<b>Напомена</b>	радна температура $55\pm 1\ ^\circ C$				

**Табела 3.5** План експеримента за таложење превлака хрома

Врста превлаке	Стање површине		Програм наношења превлаке			
	Врста обраде	Тврдоћа, HRC	1	2	3	4
<b>ХРОМ</b>	Брушење, режим А4 ( $Ra=1.151-1.330$ )	$\leq 20$		x		x
		25 - 30	x		x	
		40 - 45	x	x		x
	Брушење, режим А3 ( $Ra=0.880-1.150$ )	$\leq 20$	x	x		
		25 - 30	x		x	
		40 - 45	x		x	x
	Брушење, режим А2 ( $Ra=0.740-1.090$ )	$\leq 20$		x	x	x
		25 - 30	x		x	
		40 - 45		x		x
	Брушење, режим А1 ( $Ra=0.690-0.870$ )	$\leq 20$		x	x	
		25 - 30	x	x	x	x
		40 - 45		x	x	x
	Полирање ( $Ra=0.349-0.690$ )	$\leq 20$	x	x		x
		25 - 30		x		x
		40 - 45	x	x	x	

Хемијско нагризање површине основног метала обављено је у 20% раствору сумпорне киселине при следећим параметрима:

- радна температура од 20 до 25  $^\circ C$ ,
- време обраде од 2 до 4 минута.

После нагризања узорци су детаљно испирани у проточној води. Таложeње превлака хрома обављено је у хроматно-сулфатном електролиту следеће концентрације:

- хром (VI) оксид,  $\text{CrO}_3$  - 160 до 180  $\text{g/dm}^3$ ,
- сумпорна киселина,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - 1.5 до 2.5  $\text{g/dm}^3$ ,

Испитивање је показало да промена концентрације у овом опсегу нема утицаја на процес таложeња хрома према задатом програму.

После таложeња превлака, узорци су прво детаљно испирани у проточној води, а после у топлој води и на крају осушени топлим ваздухом.

## 4. ИСПИТНА И МЕРНА ОПРЕМА

У оквиру овог поглавља приказана је опрема коришћена у процесу припреме узорка за испитивање и карактеризацију испитиваних превлака. Анализи исталожених превлака цинка и хрома претходила је израда узорка и одређивање њихових карактеристика, тврдоће и храпавости. Претходна обрада узорка обављена је глодањем, после чега је извршена термичка обрада на различите тврдоће. Завршна обрада површина за таложење превлака обављена је са више технологија израде, брушењем, пескарењем, полирањем.

### 4.1 Мерење тврдоће

Испитивање тврдоће површине обрађених узорка извршено је по методи Роквел HRC, на уређају *Wolpert Wilson Instruments* (слика 4.1), у РЈ Контрола квалитета фабрике ЗАСТАВА оружје АД у Крагујевцу - погон Термичке обраде. Код ове методе се у метал (по овој методи се мери тврдоћа само металних материјала) утискује дијамантска купа. Купа на врху има угао од 120°. Код Роквел методе се, за разлику од Бринелове и Викерсове, мери дубина продирања пенетратора, а не величина отиска.

Укупна могућа дубина продирања износи 0,2 mm и подељена је на 100 делова. Једна подела износи према томе 0,002 mm, и представља један степен тврдоће по Роквел методи. Скала је окренута наопако, па почетном положају припада вредност 100, а највећој могућој дубини продирања 0. Разлог томе је чињеница да се мањој дубини продирања (тврђи материјали) додељује већи број који карактерише већу тврдоћу, и обрнуто.



Слика 4.1 Уређај за мерење тврдоће

## 4.2 Мерење микротврдоће

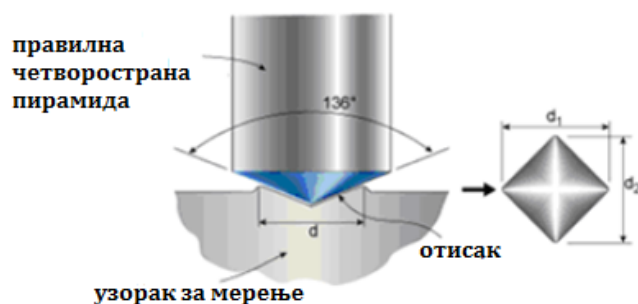
Мерење микротврдоће исталожених превлака извршено је методом по Викерс-у ( $HV_{0.1}$ ) у РЈ Контрола квалитета фабрике Застава оружје у Крагујевцу. Мерење је извршено на уређају *Leitz Wetzlar* (слика 4.2).



Слика 4.2 Уређај за мерење микротврдоће

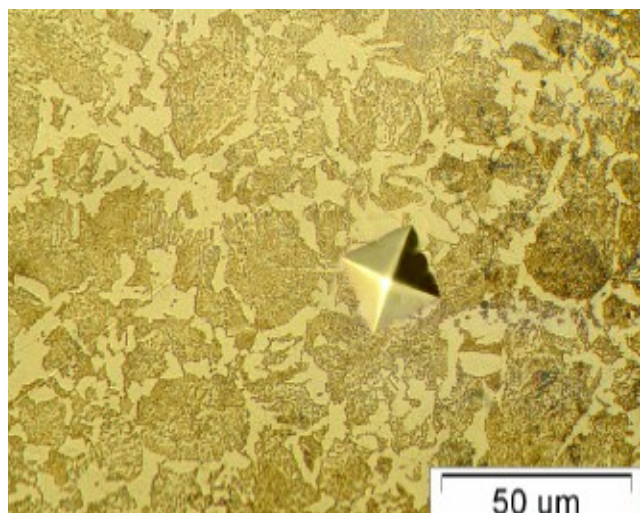
Основни делови уређаја *Leitz Wetzlar* су: радни сто, систем за оптерећивање и мерни систем за читање величине отиска (микроскоп).

Радни сто има могућност заокретања па служи и за постављање узорка и његово позиционирање. Систем за оптерећивање и микроскоп спојени су у једну целину везану за стуб тако да их је могуће померати горе-доле односно лево-десно, што је битно код оптерећивања узорка и мерења величине дијагонале.



**Слика 4.3** Мерење тврдоће по методи Викерс

Оптерећење се директно примењује комбинацијом тегова различитих маса. Зависно од потребног оптерећења, тегови се постављају на цилиндар који је повезан са ручицом за оптерећивање. Као пенетратор служи дијамантска четворострана пирамида с углом између страница од  $136^\circ$ , слика 4.3.



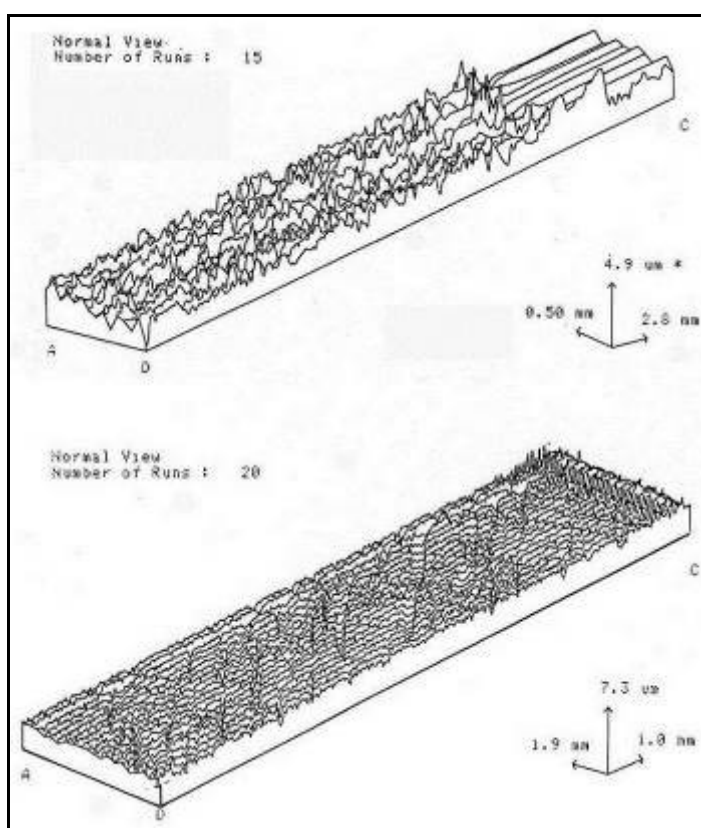
**Слика 4.4** Отисак мерења тврдоће по методи Викерс

Трајање оптерећења износи од 13 до 15 секунди. Приликом испитивања растојање између отисака мора бити веће од 2,5 дијагонале отиска, како би се избегао утицај хладног очвршћавања на местима на којима је извршено мерење. На слици 4.4 приказан је отисак дијамантског пенетратора на узорку за мерење.



### 4.3 Мерење параметара топографије

Микрогеометрија површина у контакту представља битну карактеристику структуре сваког трибомеханичког система, зато што почетно стање микрогеометрије утиче на интензитет почетних триболошких процеса. Процес хабања зависи од времена остваривања контакта и карактерише га постојање иницијалног периода интензивног хабања у току којег се завршава процес уходавања површина. При овом процесу се разарају почетне микронеравнине и образују нове, тако да се ствара микрогеометрија нове измењене структуре, слика 4.5.



Слика 4.5 Изглед површине пре и после уходавања [8].

За мерење параметара топографије коришћен је компјутеризовани мерни уређај *Talysurf- 6*, слика 4.6, помоћу кога се остварује комплексно праћење контактних површина. Уређај има велике могућности, као што су:

- мерење параметара храпавости и валовитости,
- статистичка обрада резултата мерења параметара храпавости,
- приказивање резултата, њихово меморисање и штампање,
- просторно скенирање површине.



Слика 4.6 Мерни уређај Talysurf – 6

Добијени резултати се преко програма "Serial Port Terminal" преузимају, а после тога обрађују помоћу софтвера за статистичку обраду података. Коришћењем овог мерног система добијена је представа о почетној микрогеометрији контактних површина испитиваних узорака. Микрогеометрија контактних површина испитиваних узорака представљена је преко основних параметра храпавости:

$R_{max}$  - максимална висина профила на дужини оцењивања,

$R_z$  - средња висина профила на дужини оцењивања,

$R_a$  - средње аритметичко одступање профила храпавости од средње линије профила на дужини оцењивања.

#### 4.4 Мерење дебљине превлака

Мерење дебљине превлака је обављено магнетном методом на уређају *Magne-Gage*, слика 4.7. Уређај се користи за мерење дебљине немагнетичних превлака на магнетичном супстрату. Уређај садржи стални магнет, калибрисану опругу и одговарајућу скалу. Стални магнет се приноси на површину узорка и мери се сила потребна за одвајање магнета од узорка. Што је дебљина превлаке већа, то је лакше повући магнет од испитиваног узорка. Овај начин испитивања осетљив је на површинску храпавост, закривљеност, дебљину и састав супстрата. Уређаји су преносиви и углавном не захтевају калибрацију.

Код овог уређаја врти се точкић при чему опруга повећава силу на магнету и повлачи га са површине. Толеранција мерења овог уређаја је  $\pm 5\%$ .



*Слика 4.7 Уређај за мерење дебљине превлака*

## 4.5 Оптички микроскоп

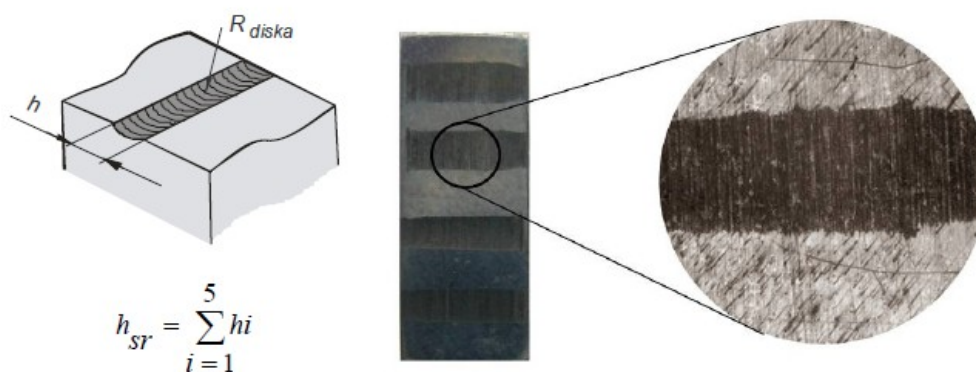
Анализа површина узорака припремљених за nanoшење превлака, као и анализа исталожених превлака и трагова хабања при триболошким испитивањима извршена је помоћу микроскопа „Meiji Techno“ у Центру за трибологију, Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (слика 4.8).



*Слика 4.8 Металушки и алатни микроскопи*

Ови микроскопи су компјутерски подржани и сваки од њих је опремљен сопственим илуминатором и камером високе резолуције. Микроскопи су опремљени објективима различитих увећања 5×, 10×, 20×, 50×, ... , 1000×.

За праћење процеса хабања превлака коришћена је промена ширине трага хабања на контактної површини испитиваних блокова, како је показано на слици 4.9.



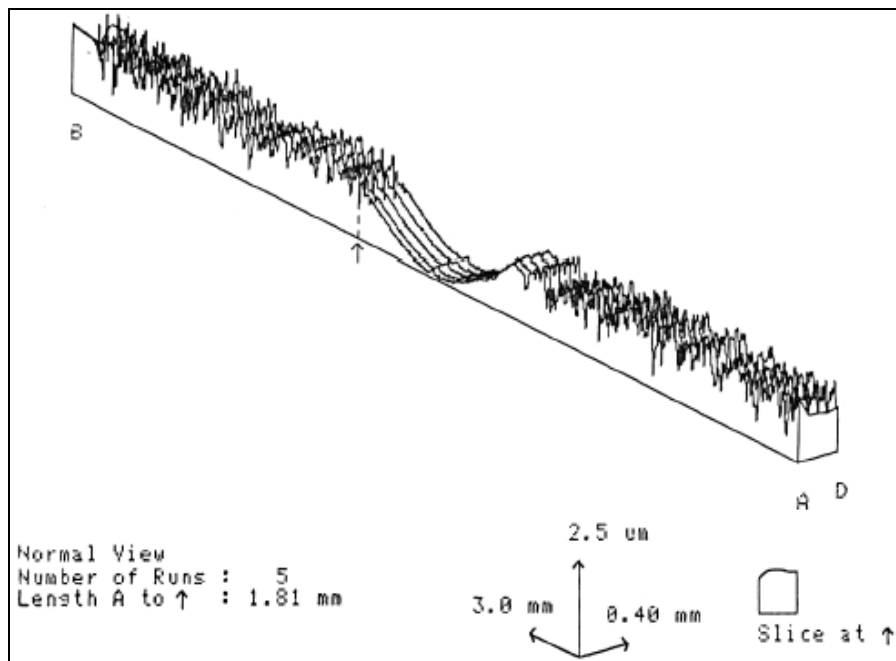
**Слика 4.9** Ширина трага хабања на блоку [8]

На универзалном микроскопу УИМ-21, слика 4.10, извршено је мерење ширине трага хабања на контактним површинама блокова.



**Слика 4.10** Универзални мерни микроскоп УИМ-21

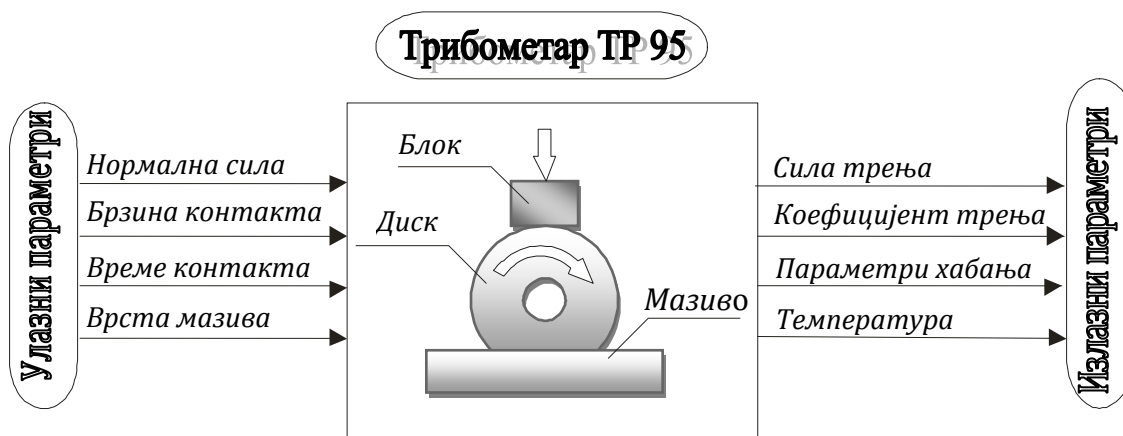
На слици 4.11, приказан је просторни изглед похабане површине испитиваног блока снимљен помоћу компјутеризованог мерног система *Talysurf- 6*.



Слика 4.11 Профилометрсање похабаног дела површине блока [8]

## 4.6 Трибометар

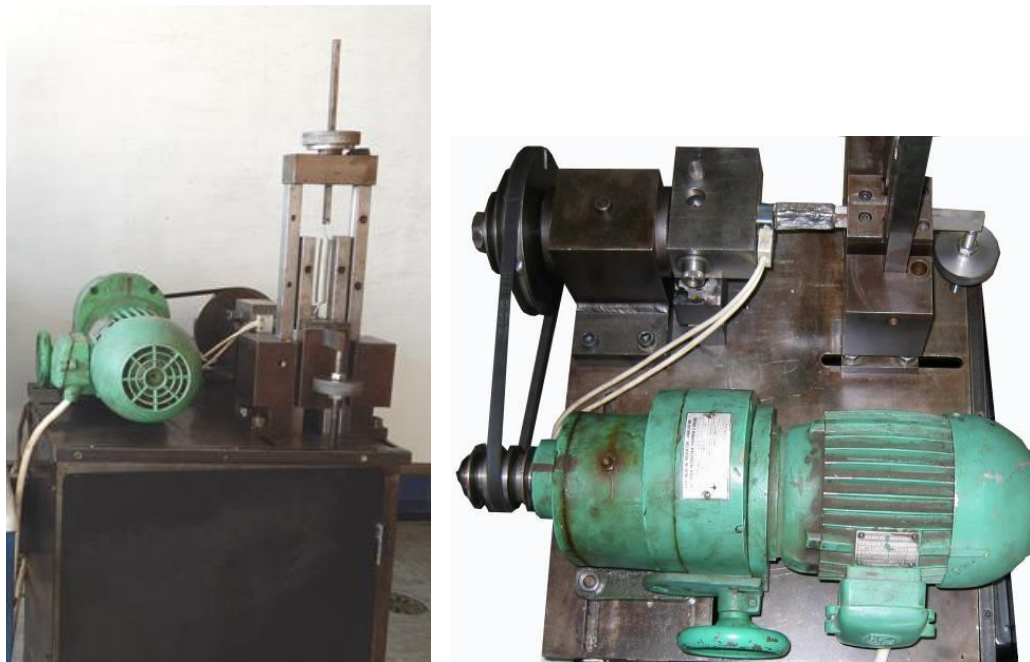
Испитивање триболошких карактеристика превлака извршена су на трибометру TR-95 са "block-on-disk" контактном геометријом у Лабораторији за трибологију и обраду резањем, Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, слика 4.12.



Слика 4.12 Трибомеханички систем са улазним и излазним параметрима [8]

Трибометар TR-95, слика 4.13, омогућава измене услова контакта са аспекта облика, димензија и материјала контактних елемената, нормалног контактног оптерећења и брзине клизања. Испитивања се могу вршити у условима са подмазивањем и без подмазивања [37]. Трибометар TR-95 чине: погонски систем,

систем за оптерећење, систем за вођење, систем за подмазивање, систем за самоподешавање блока и мерни систем.



**Слика 4.13** Трибометар TR-95

Систем за самоподешавање блока и диска служи да обезбеди преношење нормалног оптерећења у правцу осе диска и контакт целом дужином блока на диску. Систем је реализован конструкцијом специјалног ротирајућег носача блока (слика 4.14)



**Слика 4.14** Ротирајући носач блока [8]

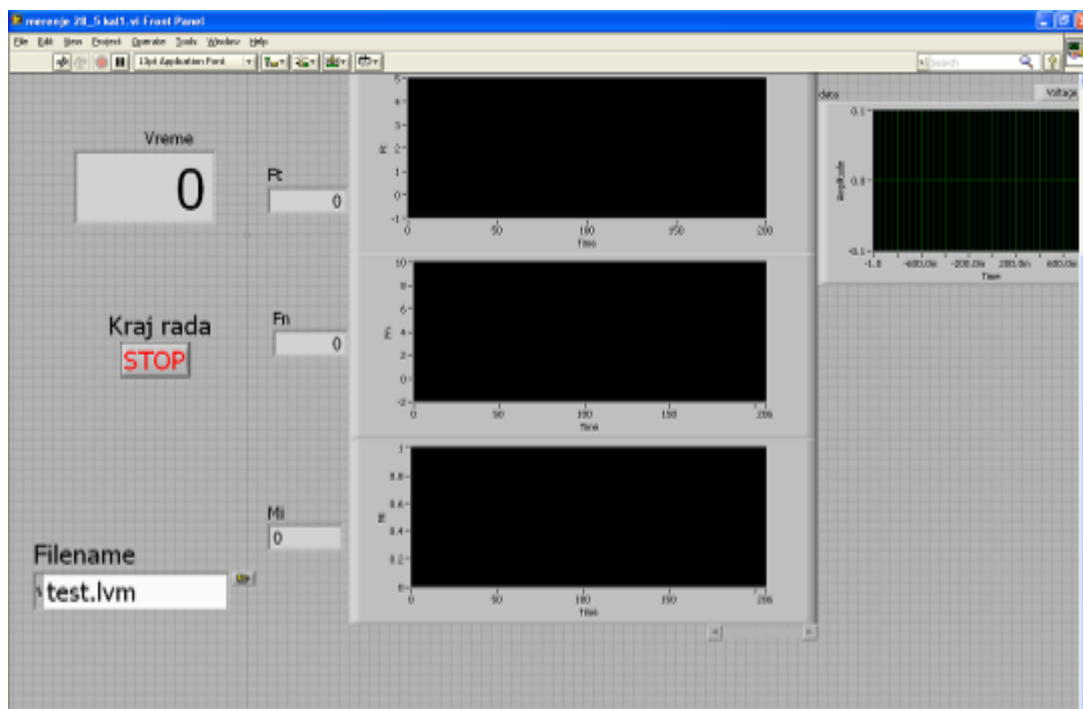
За експериментално испитивање формиран је мерни систем (слика 4.15.) који се састоји од:

- динамометра са мерним тракама,
- мерног појачивача,
- прикључног панела,
- АД конвертора, и
- ПС рачунара.



Слика 4.15 Изглед мерног система

Мерни систем омогућава мерење нормалне силе и силе трења. Кроз процес АД конверзије и аквизиције сигнала нормалне силе  $F_n$  и силе трења  $F_t$ , добија се рачунски сигнал коефицијента трења. Са мерних давача (динамометара), преко појачавача доводе се аналогни сигнали сила  $F_n$  и  $F_t$  на АД конвертор (претварач), после чега се сигнал шаље у РС рачунар.



Слика 4.16 Изглед радног окружења апликације у LabVIEW за мерење  $F_n$ ,  $F_t$  и  $\mu$

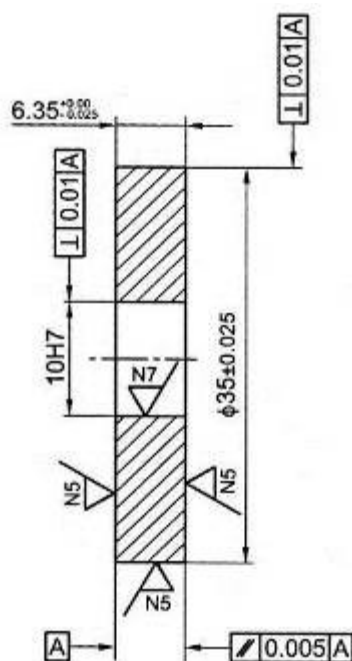
За аквизицију података коришћен је софтвер *LabVIEW* верзија 10.0. Аквизиција сигнала свих мерених вредности вршена је са 100 тачака у секунди (100 Hz). За праћење процеса и запис сигнала, развијена је посебна корисничка апликација, слика 4.16.

Апликација омогућава следеће:

- прикупљање података са трибометра у току времена,
- приказ вредности мерених величина у реалном времену,
- калибрацију физичких величина које се мере на трибометру,
- креирање датотека са подацима мерених величина,
- приказ резултата мерења.

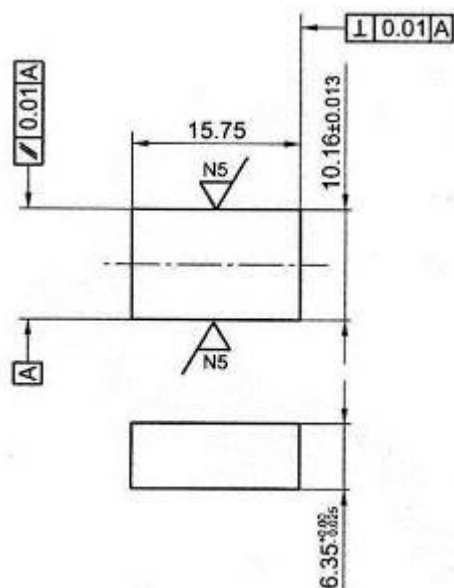
Контактни пар за испитивање је формиран према захтевима "ASTM G 77" стандарда. Сачињава га ротациони диск израђен од челика *30CrNiMo8*, тврдоће 60-62 HRC, са брушеним површинама, храпавости  $Ra=0.368 \mu m$ , (слика 4.17), и стационарни блок (слика 4.18).

Блокови су израђени од испитиваних материјала са различитим тврдоћама и класама храпавости.



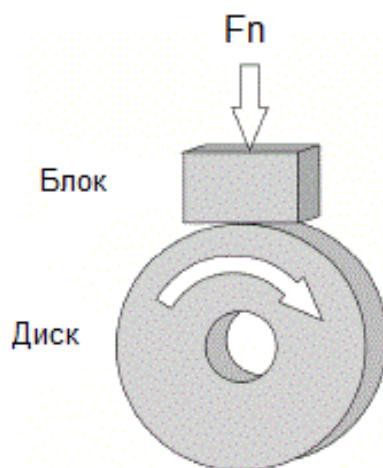
Слика 4.17 Димензије диска према стандарду ASTM G 77





Слика 4.18 Димензије блока према стандарду ASTM G 77

Контакт испитиваних блокова и диска приказан је на слици 4.19.



Слика 4.19 Диск и блок

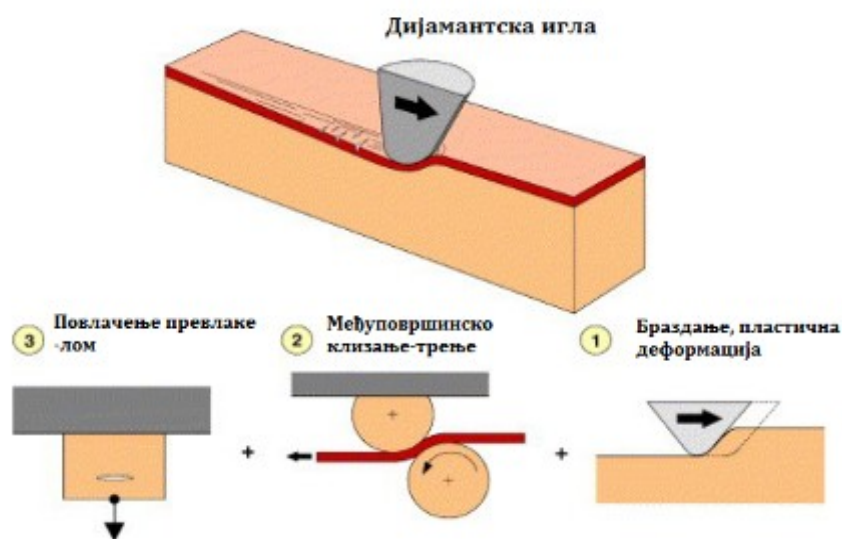
## 4.7 Тест браздањем - scratch test

Тест браздањем пружа квалитативне информације о чврстоћи везе између превлаке и подлоге, те делимично и увид у отпорност трибосистема на абразију [106].

Тест се изводи кретањем дијамантског Роквел С утискивача по површини узорка силом која континуално расте. Ако се при том узорак помера константном брзином, напрезање на месту додира утискивача и површине изазива истискивање материјала, као и љуштење или кидање превлаке.

Нормална сила код које се појави прво оштећење превлаке назива се критична сила и означава се  $L_c$ ,  $N$ . Тест може да се примењује код превлака различитих дебљине од 0,1 до 200  $\mu m$ , па због тога покрива широко подручје примене.

Шематски приказ клизања утискивача по подлози с превлаком показан је на слици 4.20, [106]. Понашање материјала током испитивања подељено је у три независне фазе како би се приказао утицај додира и механизми деформације, као што је приказано на слици 4.20.



Слика 4.20 Шематски приказ утискивача *scratch* теста дуж превученог узорка, [106]

Фаза један, на почетку теста, је утискивање (браздање) утискивача у материјал подлоге. Материјал подлоге се еластично и пластично деформише и обликује се жлеб (траг). Фаза два приказује савијање и повлачење слободне превлаке као плоче између ваљака (нема трења) и непомичног ослоња. Горња површина превлаке у додиру је с предњим делом утискивача и сила потребна за повлачење превлаке једнака је сили трења између превлаке и утискивача. Фаза три показује повлачење превлаке у једној тачки на површини, док је други крај учвршћен као слободна танка плоча. Повећање силе повлачења резултира пуцањем на месту највећег напрезања на истезање. У стварности превлака је чврсто приљубљена уз подлогу.

Клизање сферичног дијамантског утискивача по површини превлаке изазива пластичну и еластичну деформацију превлаке по којој клизи, како је шематски приказано на слици 4.21. На почетку испитивања утискивач, са предоптерећењем,

обликује сферични отисак и истискујући пластично деформисани материјал превлаке око утискивача у облику торуса (прстена). Кретањем утискивача по подлози сила оптерећења расте, а са њоме и дубина трага (бразде, жлеба) у превлаци. Испод утискивача је пластична и еластична деформација материјала превлаке, док је на површини превлаке иза утискивача само пластична деформација.



**Слика 4.21** Квантитативни дијаграм вредности силе трења акустичке емисије за испитивање браздањем [106]

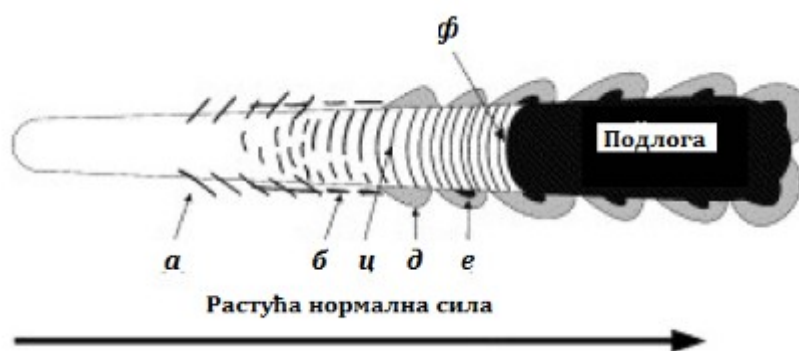
Напрезања на површини превлаке резултат су следећа четири фактора [106]:

- Сила трења. Између врха утискивача и површине превлаке сила трења узрокује напрезања на притисак од сила потискивања испред врха утискивача и напрезања на затезање од сила повлачења иза врха утискивача.
- Геометрија. Еластичне и пластичне деформације су у облику сферичног отиска, жлеба трага и торуса. Они се манифестују савијањем превлаке, како је приказано на слици 4.21. Јављају се напрезања на истезање и притисак.
- Највећа пластична деформација. Кретање утискивача по подлози изазива пластичну деформацију која достиже највећу вредност под углом  $45^\circ$  од равни симетрије превлаке.
- Заостала напрезања. Уобичајено је да танке керамичке превлаке, у зависности од поступка наношења, поседују врло значајна заостала напрезања на притисак.

Кретање дијамантског утискивача континуално растућом нормалном силом по површини узрок је напрезањима која, изазивају пукотине и истискивање материјала.

Појава пукотина у трагу (жлебу) приликом испитивања према [106] приказана је на слици 4.22. и деле се на:

- (а) пукотине под углом (engl. *angular cracks*),
- (б) пукотине паралелне са трагом (engl. *parallel cracks*),
- (ц) попречне пукотине (engl. *transverse semi-circular cracks*),
- (д) одвајање превлаке (engl. *coating chipping*),
- (е) делимично одломљена превлака (engl. *coating spalling*),
- (ф) потпуно одломљена превлака (engl. *coating breakthrough*).



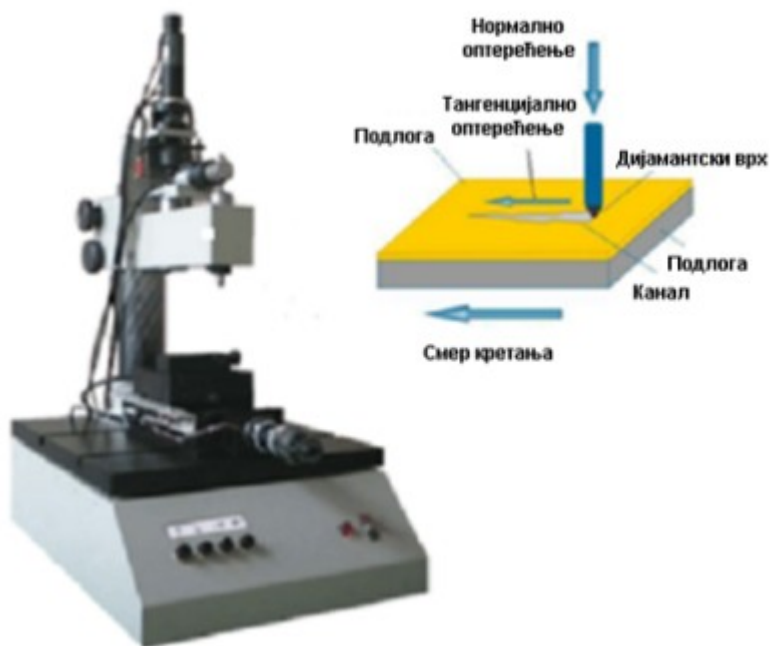
Слика 4.22 Подела пукотина у трагу браздања [107]

Појаве ових пукотина јављају се при одређеним критичним силама па се величина критичне силе најчешће одређује помоћу анализе микроскопом. Ако је позната почетна сила, пораст силе  $N/s$  и брзина померања узорка, једноставним мерењима димензија могуће је одредити удаљеност на којој се појавило прво оштећење, а тиме и израчунати припадајућу силу. Да би се оштећења лакше препознала, израђени су атласи с фотографијама и облицима оштећења превлаке које се могу појавити као последица теста [38].

Тест браздањем је проведен на узорцима да би се добиле информације о чврстоћи везе подлоге и превлаке. Испитивање је извршено на уређају **Scratch tester ST-99**, слика 4.23.

Основне карактеристике уређаја су:

- максимална нормална сила: 200 N,
- пораст силе: до 400 N/min,
- брзина померања узорка: до 40 mm/min,
- пут узорка: до 20 mm.



Слика 4.23 Scratch tester ST-99

## 4.8 Микроскоп атомских сила

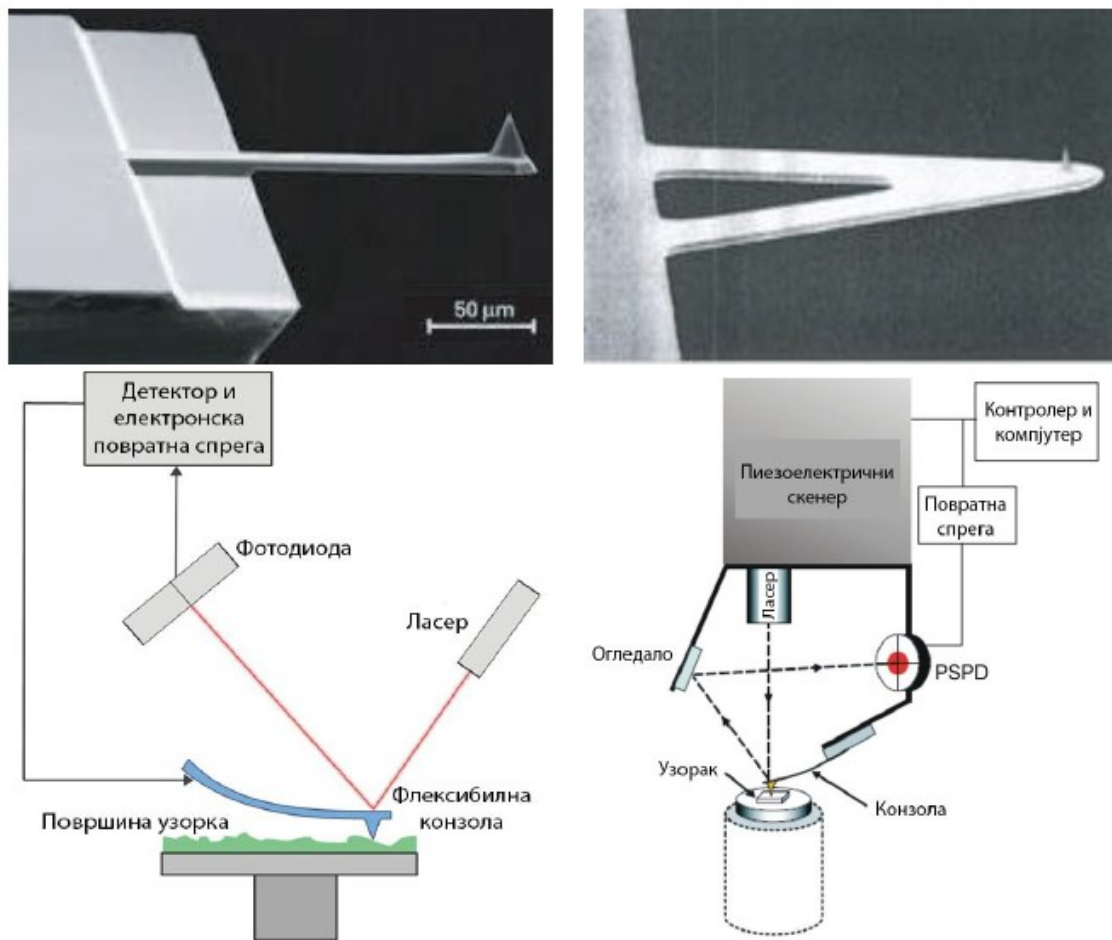
Помоћу микроскопа атомских сила (Atomic Force Mikroskop - AFM) врше се истраживања која имају научни и инжењерски значај у размерама које су на атомском нивоу. Микроскоп атомских сила користи технику скенирања у циљу добијања „3D“ слике површине узорка [114].

Уређај се састоји од три система који раде као једна целина којом се управља помоћу рачунара користећи принцип повратне спреге:

- систем за детектовање силе,
- систем за детектовање извијања конзоле и
- систем за позиционирање.

АФМ се користи за мерење површинске храпавости и силе трења. Систем за детектовање силе је део АФМ-а који има директну интеракцију са површином скенираног узорка, направљен је као флексибилна конзола која на свом слободном крају има сензор. Силе које делују између сензора и површине узорка изазивају померање конзоле, у зависности од силе конзола се увија и/или савија приликом скенирања узорка. Радијус сензора је реда величине неколико нанометра а његова дужина је реда величине неколико микрометара. Димензије

конзоле су такође на нивоу микрометара, дужина је око 100  $\mu\text{m}$ , ширина 10  $\mu\text{m}$ , док дебљина варира од 0,5 до 5  $\mu\text{m}$ .



**Слика 4.24** Флексибилна конзола са контактним врхом и принцип мерења AFM-а [114]

Систем за детектовање извијања конзоле ради на следећи начин. Ласерски сноп се одбија са задње стране конзоле и преко огледала долази до „PSPD“-а (Position Sensing Photo Detector). Померање врха сензора на конзоли изазива промене излазног напона у „PSPD“-у. Ова промена напона преко повратне спреге, узрокује померање целог система за детектовање извијања конзоле који чине ласер, огледало и „PSPD“. На слици 4.24 приказана су нека конструктивна решења флексибилних конзола, као и графички приказ начина рада микроскопа атомских сила.

Позиционирање и фино подешавање релативног положаја сензора на слободном крају конзоле врши се помоћу пиезоелектричног скенера док се груба подешавања положаја врше помоћу корачног мотора када је то могуће.

Микроскоп атомских сила може да ради у различитим режимима у зависности од врсте мерења или у зависности од површине узорка који се анализира.

Најважнији режими су:

- Режим мерења нормалних сила,
- Режим мерења тангенцијалних сила,
- Модуларни режим.



**Слика 4.25** Микроскоп атомских сила - AFM

У склопу истраживања обављених при изради ове докторске дисертације микроскоп атомских сила (слика 4.25), употребљен је за карактеризацију електрохемијски исталожених превлака цинка и хрома на подлогама добијеним различитим технологијама.

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Основни циљ експерименталних испитивања је испитивање утицаја фактора процеса завршне обраде подлоге на карактеристике галванских превлака, цинка и хрома. Треба нагласити да у тренутку писања овог рада, нису пронађени радови који се баве карактеризацијом галванских превлака у зависности од карактеристика подлоге, тврдоће и топографије. Шема испитивања приказана је на слици 5.1.

Код обе испитиване превлаке вариране су поменуте карактеристике подлоге за њихово наношење у зависности од начина добијања, односно примењене технологије завршне обраде. Поред класичних испитивања превлака дефинисаних стандардима у раду су примењене и методе које се ређе срећу код карактеризације превлака као што су "scratch" тест за одређивање адхезије и испитивање триболошких карактеристика исталожених превлака.

Спољни изглед превлака оцењиван је визуелно, а морфологија методом оптичке микроскопије и применом АФМ микроскопа. Дебљина превлака одређивана је магнетном методом. Приањање превлака за основни метал одређивано је стандардизованим методама, методом загревања и "scratch" тестом. Испитивање микротврдоће вршено је по методи Викерс  $HV_{0.1}$ .

Триболошка испитивања су извршена са "block-on-disk" контактном геометријом, а добијени трагови хабања су анализирани употребом оптичког мерног микроскопа.





Слика 5.1 Шема испитивања

## 5.1 Превлаке цинка

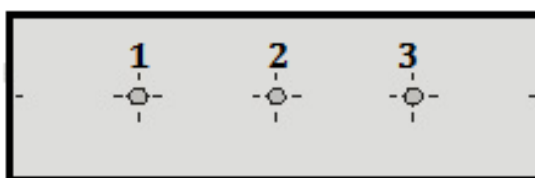
Преглед узорака са превлакама цинка дат је у табели 5.1. У табели су дате карактеристике превлака са условима таложeња и карактеристике подлоге на којој су исте нанете. На свим узорцима прво је извршен преглед спољашњег изгледа. Изглед превлаке праћен је визуелно, на дневној светлости, под углом од 45°. Површина превлаке је сјајна и глатка, нема прегорелих и непокривених места.

Табела 5.1 Преглед узорак са превлакама цинка

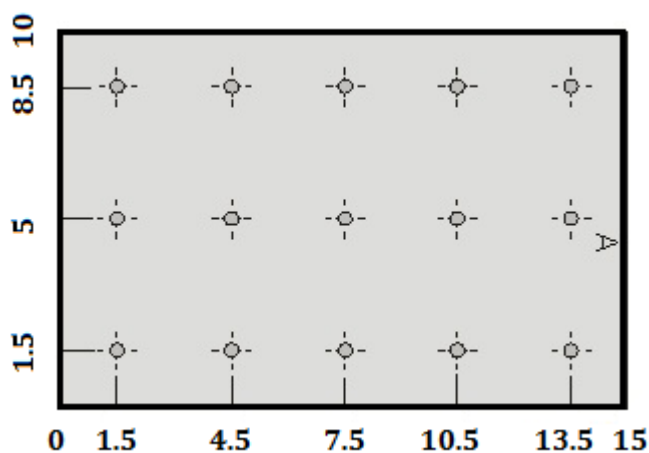
Узорак број	Карактеристике подлоге			Параметри таложења		Карактеристике превлаке		
	Врста обраде	Тврдоћа HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Густина струје, A/dm <sup>2</sup>	Време min.	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	
5	Брушење, грубо	16	1.150	2	40	23.98	1.472	
7		29	0.780		40	23.87	0.980	
14		40	1.120		20	16.50	1.390	
20		33	0.950		20	13.08	1.114	
21		44	0.900		40	22.00	1.158	
28		43	0.990		40	28.96	1.140	
41		30	0.950		20	14.98	1.130	
42		30	0.840		20	10.54	1.180	
43		17	0.780		40	25.00	3.190	
1		Брушење, фино	30		0.710	40	20.52	0.930
2	40		0.620		20	14.98	0.744	
12	36		0.624		40	25.71	0.797	
15	17		0.676		20	12.70	0.780	
18	19		0.844		40	23.87	0.918	
26	40		0.680		40	22.15	0.720	
27	43		0.610		20	13.97	0.748	
32	16		0.700		20	13.97	0.930	
40	49		0.610		20	10.54	0.680	
44	39		0.660		20	14.00	0.920	
45	39		0.719		40	28.76	1.112	
46	39		0.966		20	10.16	1.040	
47	49		0.660		40	18.80	0.826	
48	39		0.697		20	13.46	0.824	
49	29		0.710		20	9.8	0.835	
6	Глодање		36		2.380	20	11.68	2.560
8			20		2.630	20	18.13	2.800
9			20		2.390	20	10.23	2.560
10			27		2.420	40	20.16	3.120
22		16	2.330		20	12.98	2.820	
34		30	3.030		20	16.70	3.190	
35		20	2.580		40	26.10	2.870	
3	Полирање	28	0.097		20	14.22	0.241	
13		44	0.095		20	14.48	0.120	
17		44	0.176		20	16.76	0.676	
23		26	0.075		40	21.30	0.280	
24		18	0.075		20	13.97	0.240	
25		27	0.170		40	21.24	0.560	
11	Пескарење	26	1.460		20	9.27	1.720	
19		41	1.490		40	23.18	1.780	
33		38	1.510		40	21.57	0.840	
36		30	1.430		20	13.46	1.746	
38		41	1.540		40	22.10	1.760	
50		17	1.390		20	15.24	1.650	

### 5.1.1 Мерење дебљине

Мерење дебљине превлака је извршено магнетном методом помоћу уређаја приказаног на слици 4.5 у РЈ Контрола квалитета фабрике Застава оружје АД, Крагујевац. Мерење је извршено на површини Р на слици 3.1, на три мерна места, слика 5.2. У табели 5.1 су приказане средње вредности измерене дебљине. Време таложења превлака је било 20 и 40 минута. У циљу сагледавања равномерног распореда превлаке цинка по површини основног материјала-подлоге за наношење по бочној површини узорка извршено је мерење у 15 тачака према шеми датој на слици 5.3. На слици 5.4 приказане су минималне и максималне дебљине превлака добијених за оба временска циклуса.

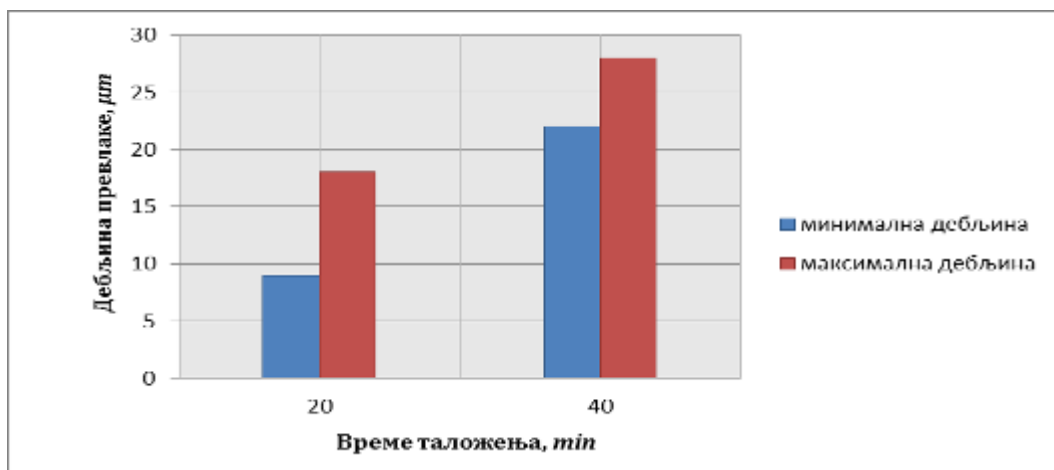


*Слика 5.2 Шема распореда места мерења дебљине превлаке по бочној површини*



*Слика 5.3 Шема распореда места мерења дебљине превлаке по бочној површини*

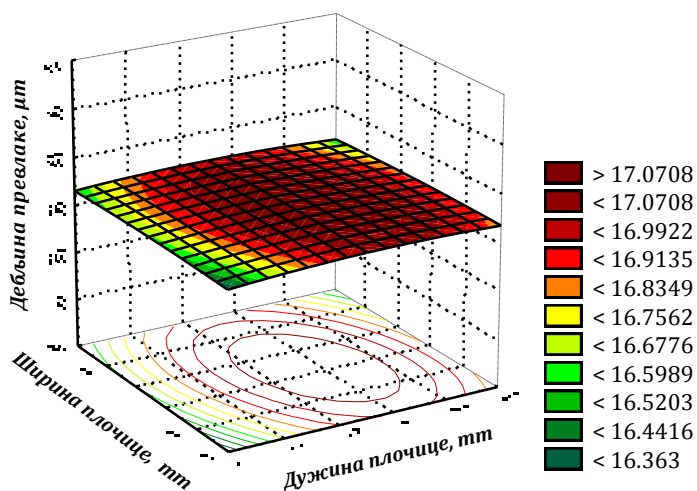
У табели 5.2 приказана је расподела дебљине превлака цинка по површини узорка добијених различитим технологијама механичке обраде. На графичким моделима (слике 5.5 - 5.9), урађеним на основу мерења дебљине јасно је просторно представљена слика расподеле дебљине превлаке по површини узорка.



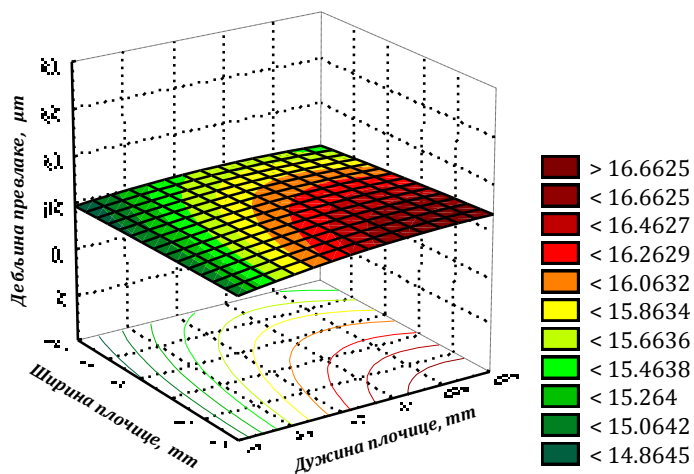
Слика 5.4 Дебљине исталожених превлака цинка

Табела 5.2 Распоред дебљина превлаке по површини узорка

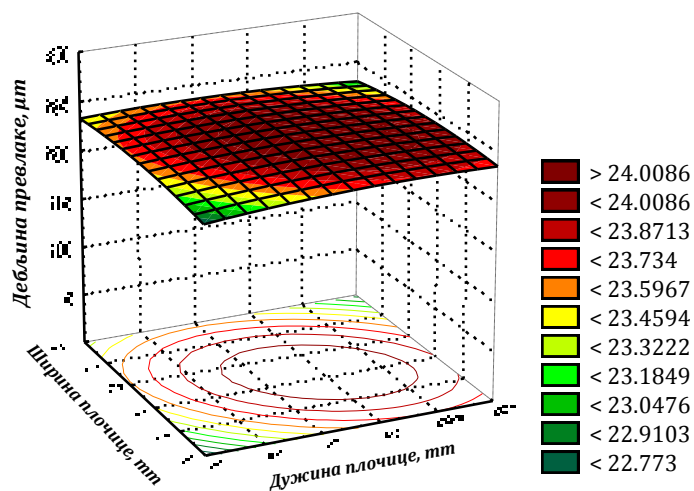
Узорак	Врста обраде	х/у	1.5	4.5	7.5	10.5	13.5
34	Глодање	1.5	16.70	17.00	16.90	17.20	16.80
		5	16.80	16.40	17.20	17.80	16.80
		8.5	16.90	16.90	17.12	16.80	16.80
50	Пескарење	1.5	15.40	15.00	15.90	18.00	16.40
		5	15.40	16.00	16.50	16.40	15.00
		8.5	15.20	15.00	15.30	15.50	16.50
7	Брушење- грубо	1.5	22.90	24.12	23.60	24.20	23.80
		5	24.20	23.82	23.90	23.88	24.15
		8.5	23.30	24.00	24.12	23.50	23.52
18	Брушење- фино	1.5	22.40	24.90	24.20	23.20	22.85
		5	22.00	22.50	24.60	23.80	22.50
		8.5	23.30	22.10	22.10	21.15	23.45
17	Полирање	1.5	16.70	17.00	16.58	17.20	16.80
		5	17.00	16.40	17.00	16.88	16.50
		8.5	16.80	17.00	17.28	16.75	16.50



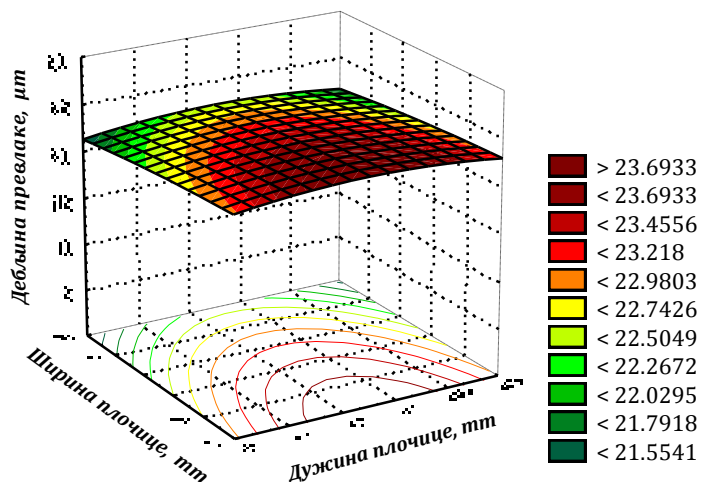
Слика 5.5 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 34



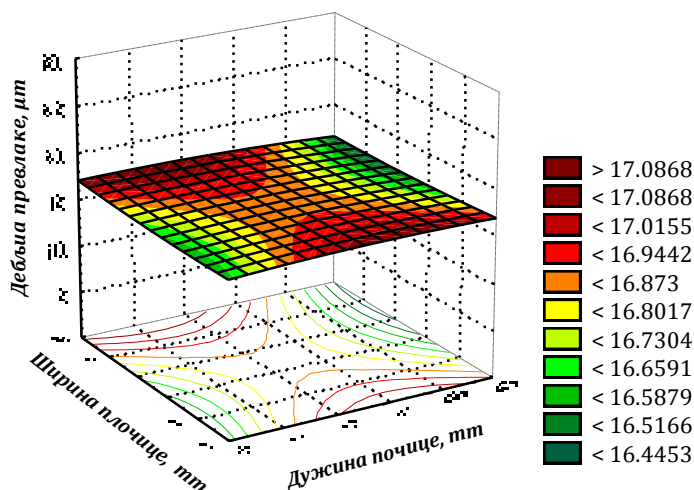
Слика 5.6 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 50



Слика 5.7 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 7



Слика 5.8 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 18



Слика 5.9 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 17

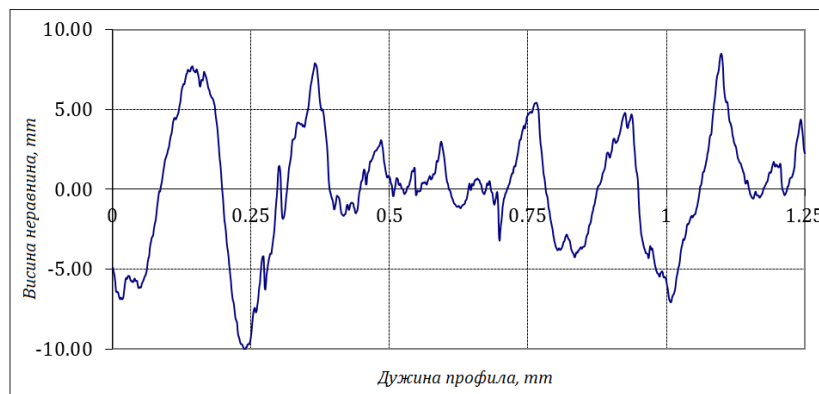
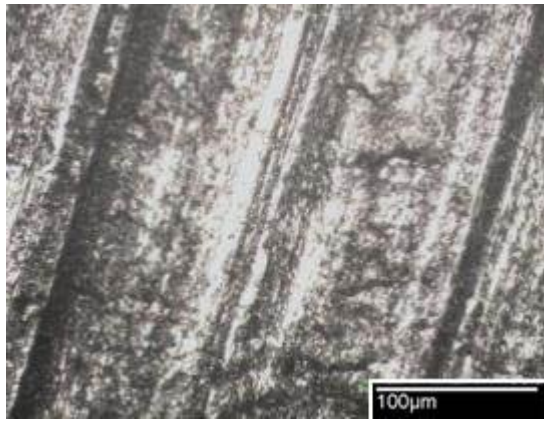
Како је показано на сликама од 5.5 до 5.9, дебљина превлаке је равномерно распоређена по површини испитиваних узорка. Одступања нису велика и превлака је равномерно распоређена по целој површини што показује да је постављени режим таложења добро изабран.

## 5.1.2 Морфологија превлака цинка

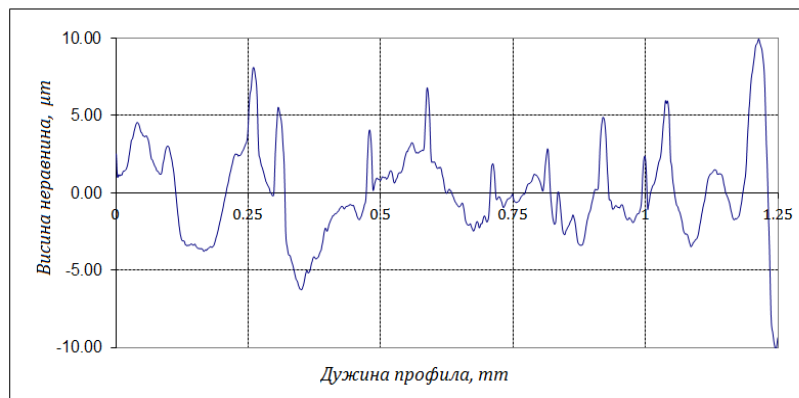
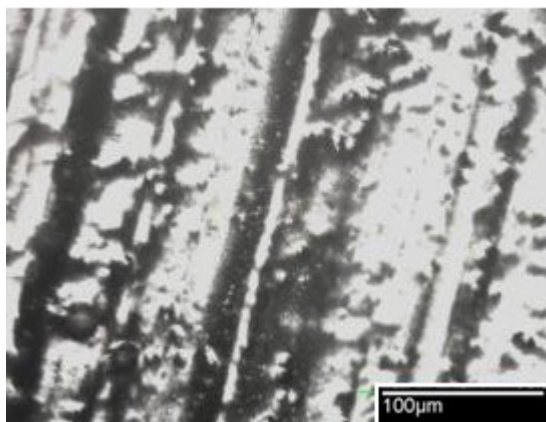
Оптичка микроскопија и микроскопија атомских сила су погодне технике за испитивање топографије талоба добијених електрохемијским путем. Применом рачунарских програма за AFM микроскопију могућа је анализа како профила површине (линијска анализа) тако и дела површине (површинска анализа). Испитивањем топографије превлака добијају се информације о величини кристалних агрегата, о присуству дефеката и укључака у талогу, као и о хомогености превлаке. Топографија површине превлаке утиче на њен сјај и отпорност према корозији [5].

### 5.1.2.1 Анализа морфологије оптичким микроскопом

Структура испитиваних превлака посматрана је на металуршком микроскопу *Meiji Techno MT 8500* у Центру за трибологију, Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (слика 4.8). На сликама 5.10 - 5.14 приказани су неки узорци добијени различитим технологијама обраде пре и после наношења превлака.

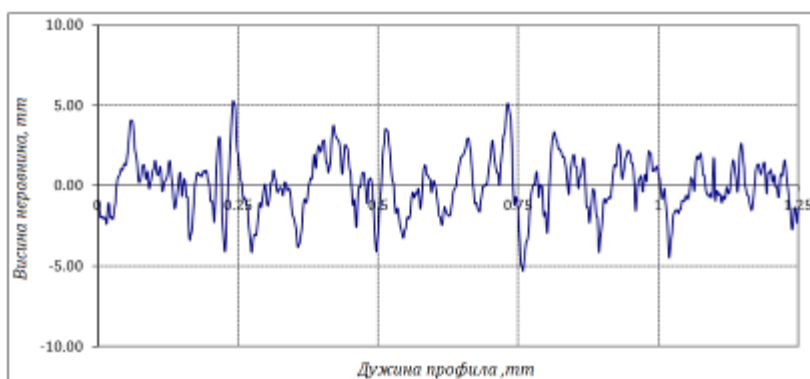
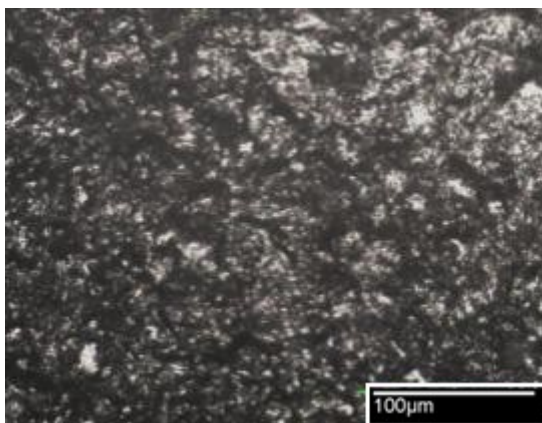


*а - пре наношења превлаке  $Ra=2.330\mu\text{m}$*

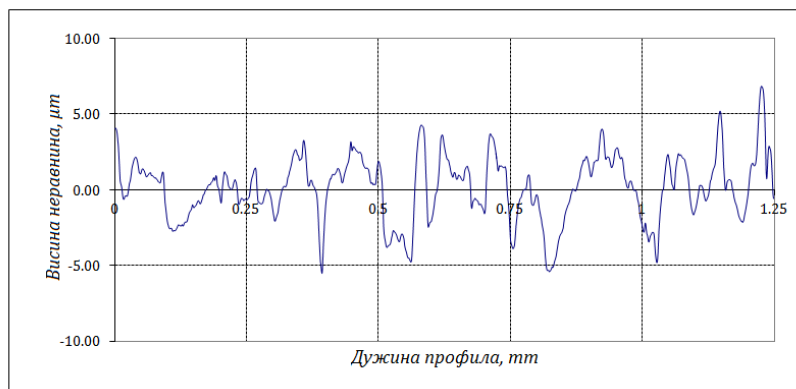
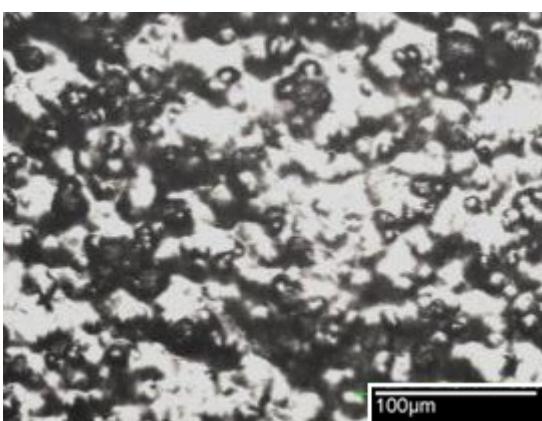


*б- после наношења превлаке  $Ra=2.820\mu\text{m}$*

**Слика 5.10** Узорак број 34, завршна обрада подлоге, глодање



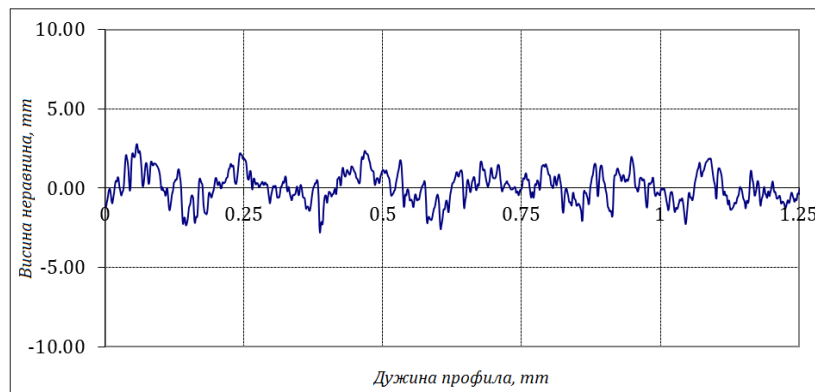
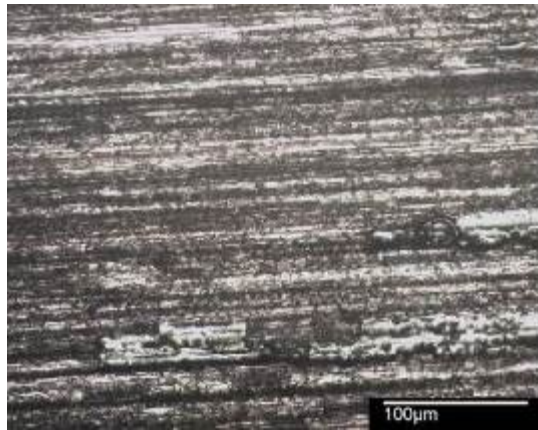
а - пре доношења превлаке  $Ra=1.390 \mu m$



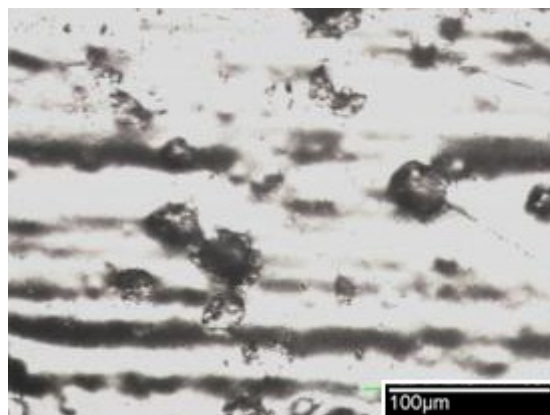
б- после доношења превлаке  $Ra=1.650 \mu m$

Слика 5.11 Узорак број 50, завршна обрада подлоге, пескарење



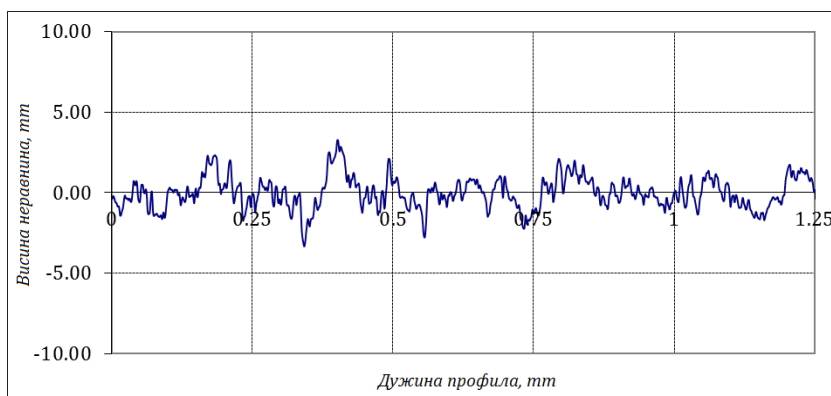
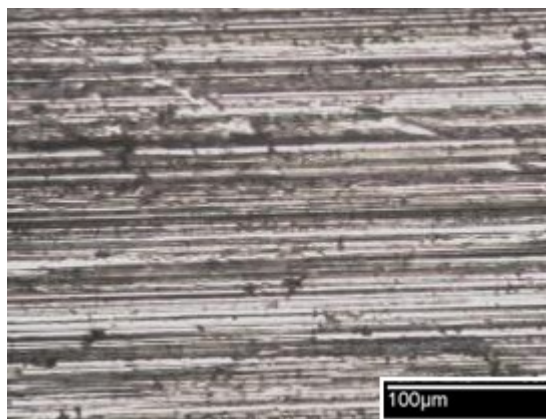


*a - пре наношења превлаке,  $Ra=0.718 \mu\text{m}$*

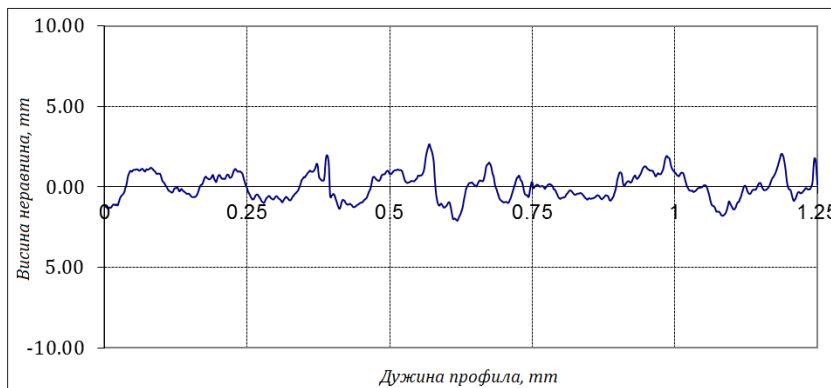
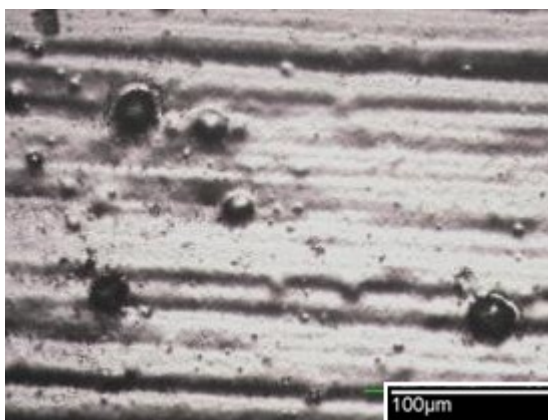


*б- после наношења превлаке,  $Ra=0.920 \mu\text{m}$*

**Слика 5.12** Узорак број 7, завршна обрада подлоге, брушење-грубо

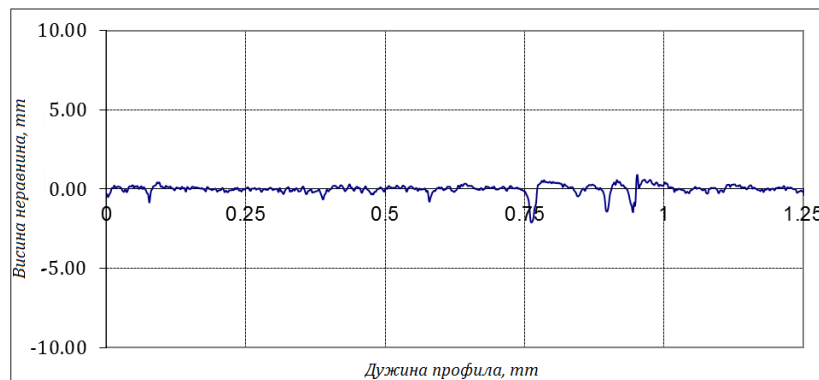
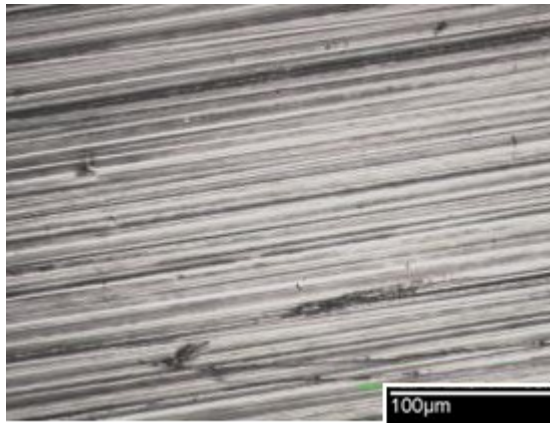


а - пре наношења превлаке,  $Ra=0.844 \mu\text{m}$

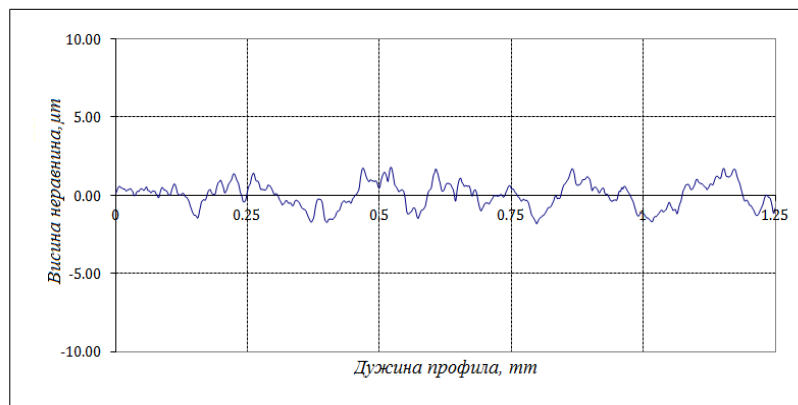
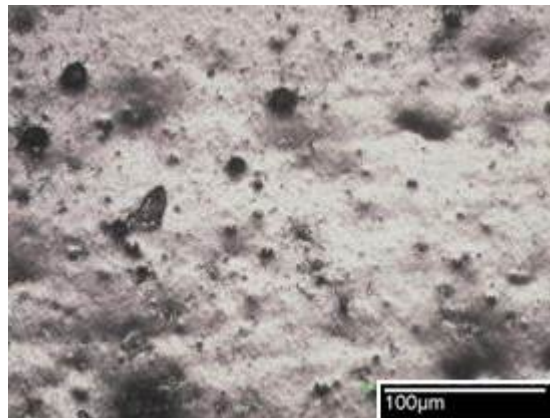


б- после наношења превлаке,  $Ra=0.918 \mu\text{m}$

Слика 5.13 Узорак број 16, завршна обрада подлоге, брушење фино



а- пре наношења превлаке,  $Ra=0.176 \mu\text{m}$



б- после наношења превлаке,  $Ra=0.676 \mu\text{m}$

Слика 5.14 Узорак број 17, завршна обрада подлоге, полирање

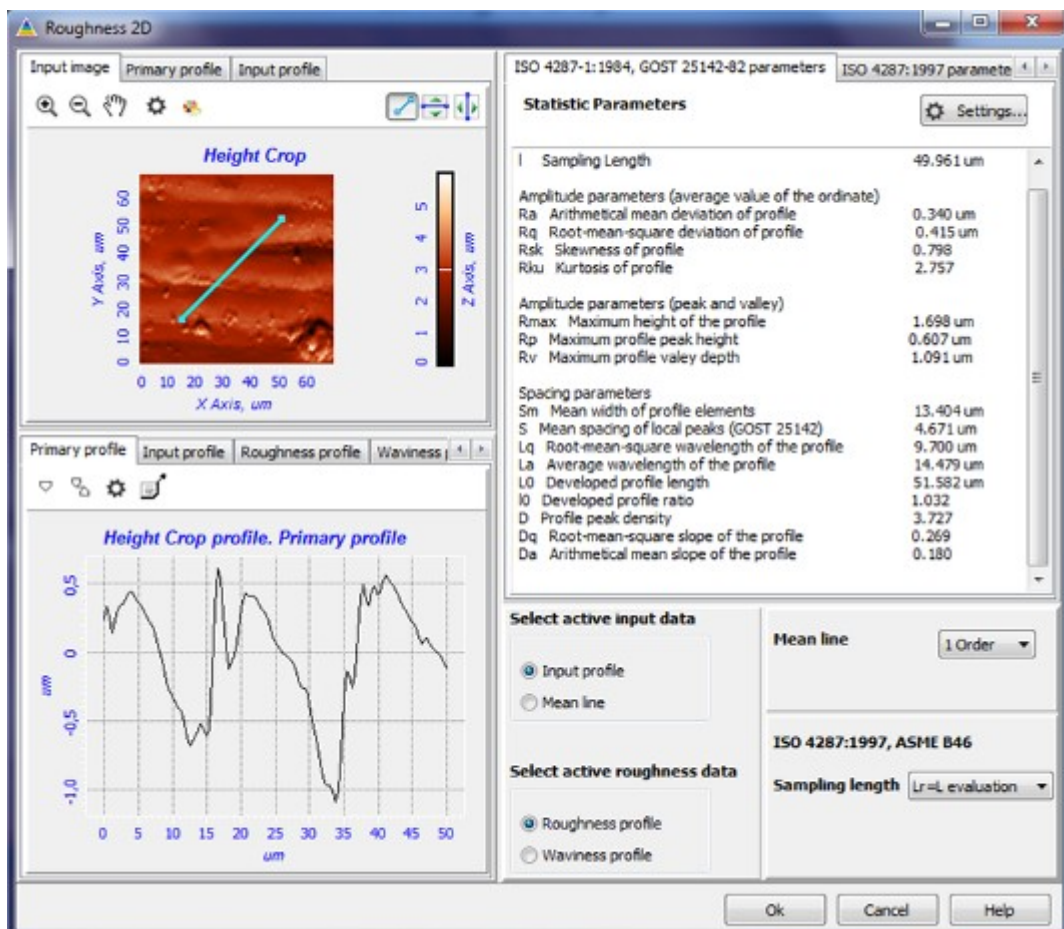
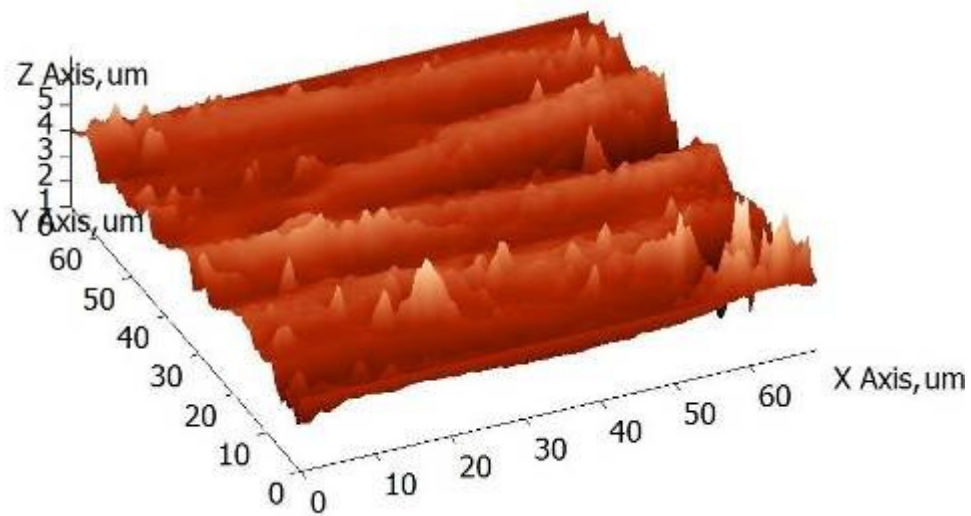
Обзиром да су све превлаке исталожене у истим условима (густина струје таложења, раствор, температура таложења), морфологија зависи само од храпавости површине и времена таложења. Исталожене превлаке су светле, чисте, нема прегорелих места што је карактеристика за превлаке таложене из алкалног раствора и густином струје од  $2 \text{ A/dm}^2$ . При већим густинама струје, превлаке постају тамне и прегореле. Зависност морфологије од густине струје се знатно разликује на превлакама из алкалног раствора у поређењу са легурама таложеним из хлоридних и сулфатних раствора. То је разумљиво, имајући у виду, да се превлаке из овог раствора таложу са знатно већим уделом процеса издвајања водоника у укупној густини струје и да се редукција јона метала одиграва из комплексних соли са великим константама стабилности.

Превлаке таложене на полираним и брушеним подлогама имају добру покривеност, равномерно су распоређене по површини, хомогене су и имају релативно глатку површину.

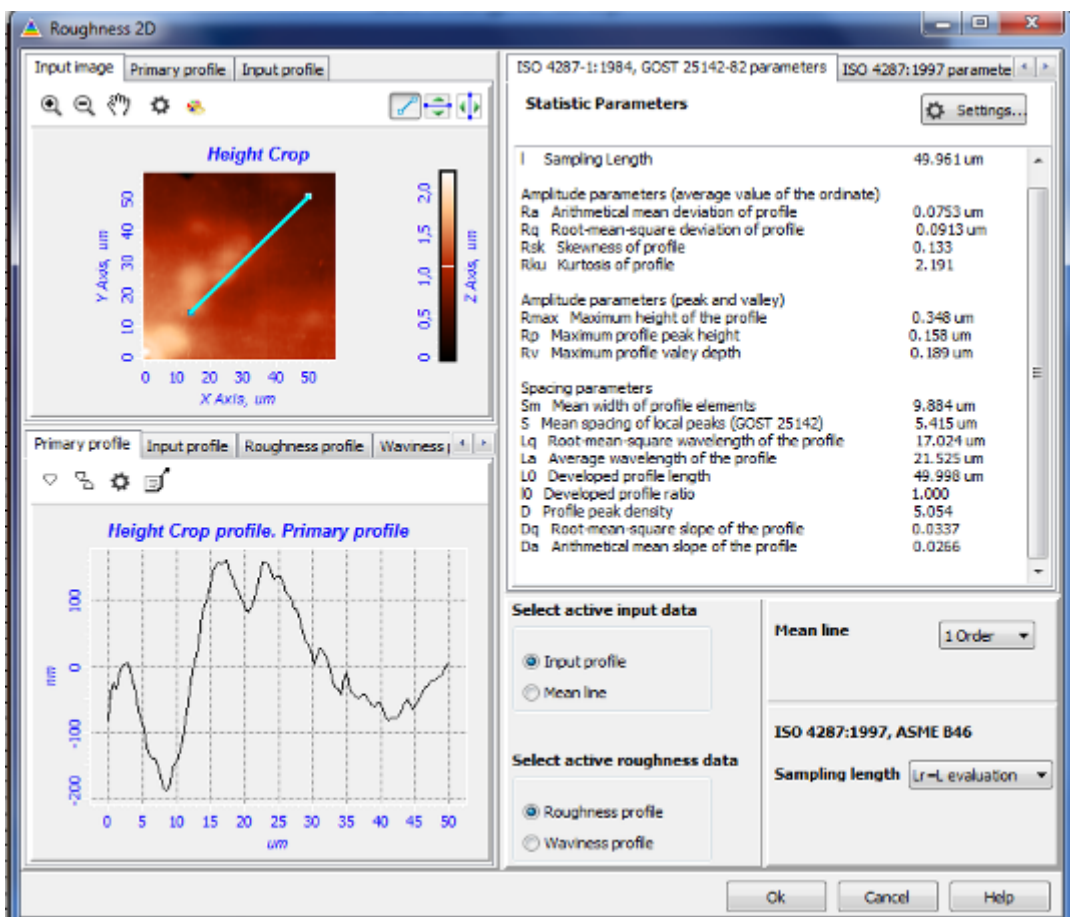
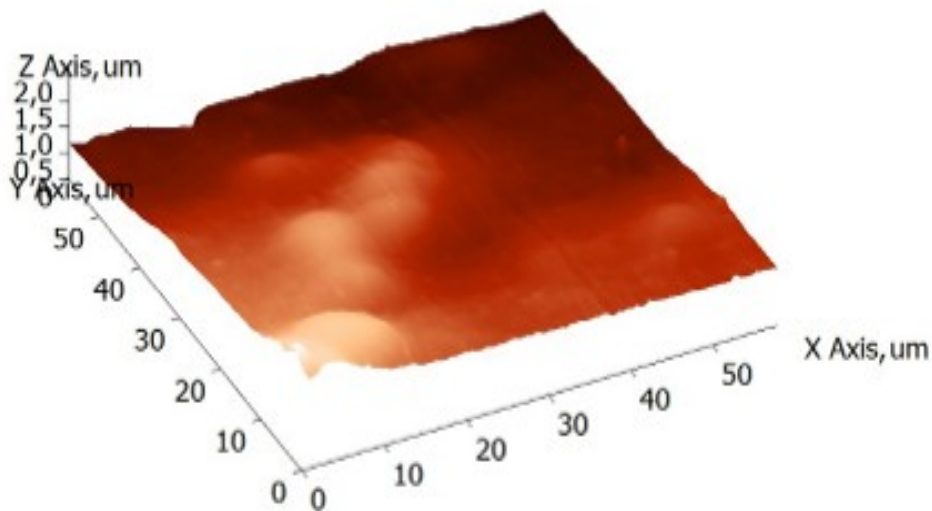
Код превлака таложених на глоданим и пескареним подлогама топографија превлаке јасно прати топографију подлоге (слике 5.10 и 5.11). Ове превлаке имају добру покривеност, равномерно су распоређене по површини, хомогене су и грубе.

#### **5.1.2.2 Анализа морфологије микроскопијом атомских сила**

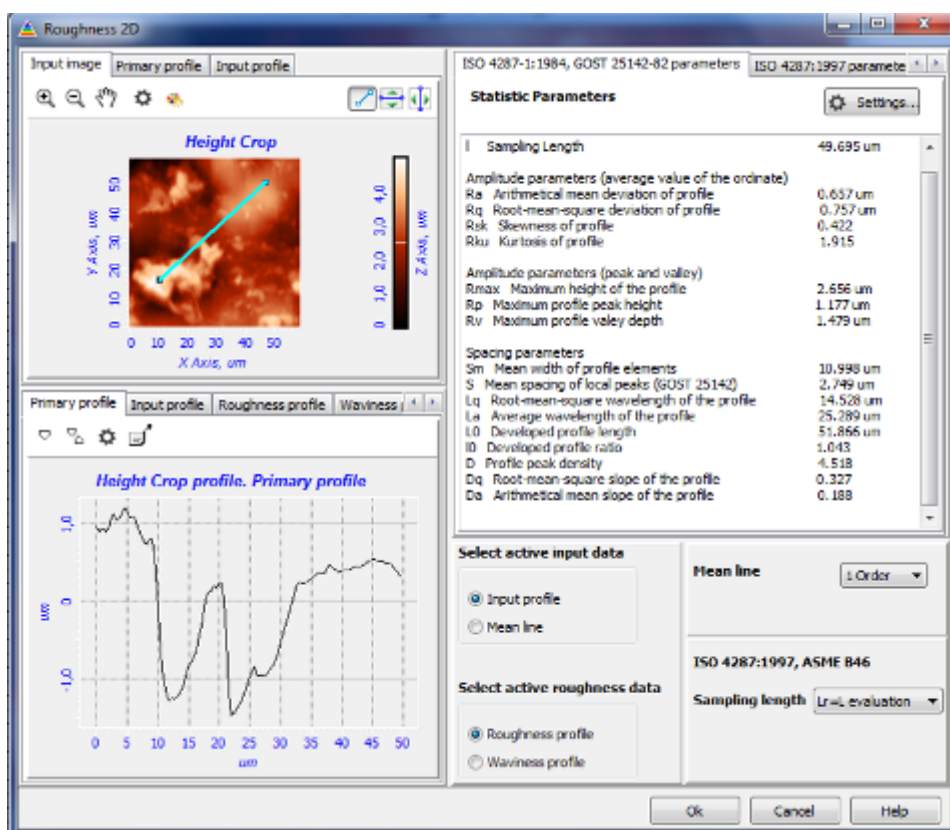
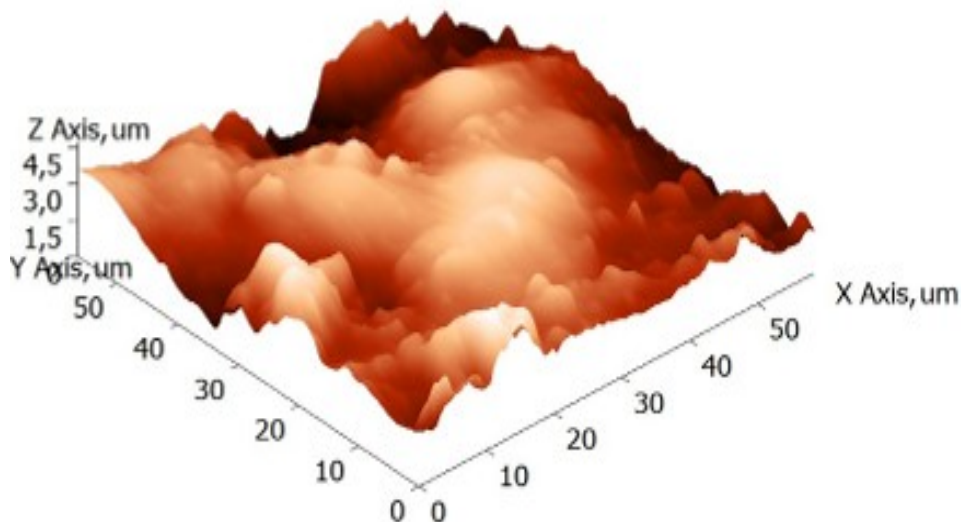
Да би се детаљније испитала структура агломерата као и да би се испитала микрохрапавост превлака цинка, узорци су испитивани микроскопијом атомских сила (AFM). На сликама 5.15 - 5.17, приказани су AFM снимци и параметри храпавости превлака цинка исталожених на површинама добијеним различитим технологијама: брушењем са више режима, полирањем и пескарењем.



Слика 5.15 Превлака на брушеној површини



Слика 5.16 Превлака на полираној површини



Слика 5.17 Превлака на пескареној површини

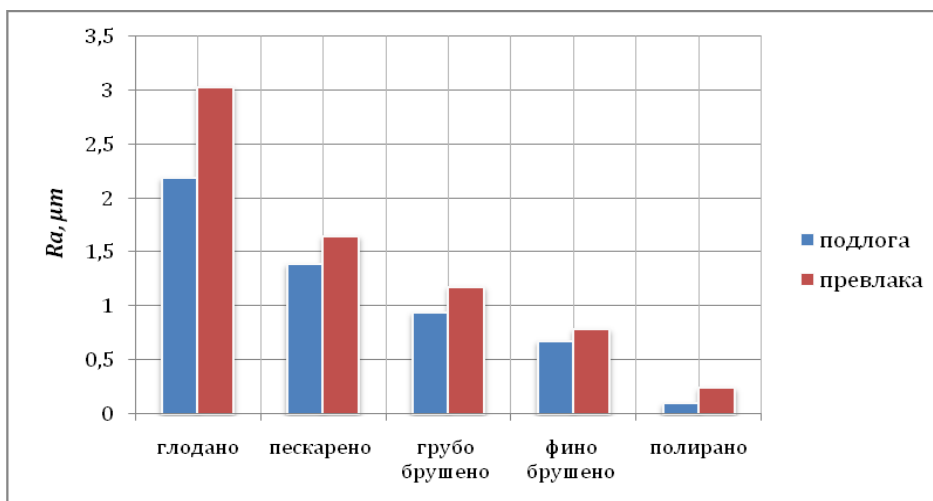
Са слика 5.15 - 5.17, односно 2D и 3D AFM приказа површина превлака, јасно се уочава утицај завршне обраде подлоге за таложeње превлака цинка. Тако на пример топографија превлаке на брушеној подлози верно прати трагове обраде. Најмању храпавост има превлака таложена на полираној површини док је превлака таложена на пескареној подлози најгрубља. Ако се посматра дебљина

превлака резултати показују на тренд раста храпавости површине са продужетком времена таложења при таложењу метала из раствора, односно са порастом времена таложења и повећањем дебљине превлаке, долази до пораста храпавости, што је у складу са литературним наводима [60, 79].

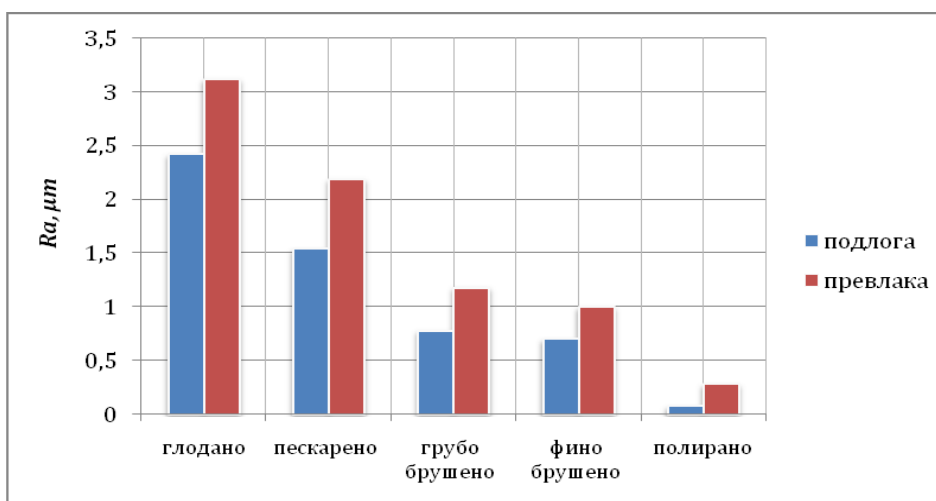
### 5.1.2.3 Храпавост превлака цинка

На слици 5.18 приказана је промена топографије за превлаке цинка у зависности од завршне обраде основног материјала – подлоге и времена таложења.

Највећа промена код превлака таложених 20 минута је на полираној и грубо брушеној подлози. Када су у питању превлаке исталожене на подлогама добијеним другим поступцима израде (глодањем, пескарењем), повећање храпавости је око 20%.



а) Време таложења  $T=20$  мин



б) Време таложења  $T=40$  мин

Слика 5.18 Промена топографије превлака цинка



Код превлака које су таложене 40 минута повећање храпавости је релативно уједначено и износи око 40%. Изузетак је превлака таложена на полираној подлози где је храпавост повећана знатно више, али је њена вредност и даље изузетно мала у односу на храпавост превлака исталожених на подлогама добијеним другим поступцима обраде.

### **5.1.3 Испитивање адхезије**

Ова испитивања су вршена на два начина, методом загревања (термичког шока) и “*scratch*” тестом. Сви испитивани узорци, према оба испитивања, су задовољили захтеве постављене стандардима. Приањање исталожених превлака цинка је добро, при испитивању нису уочене промене на превлаци које указују на одвајање превлаке од основног материјала, подлоге. Испитиване превлаке су исталожене на узорцима са различитом топографијом и тврдоћом.

#### **5.1.3.1 Испитивање методом загревања**

Испитивање адхезије је вршено методом загревања (термичког шока) према стандарду SORS 2325 [119].

Услови испитивања:

- температура загревања узорака  $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- време загревања 1 сат.
- квашење млазом хладне воде.

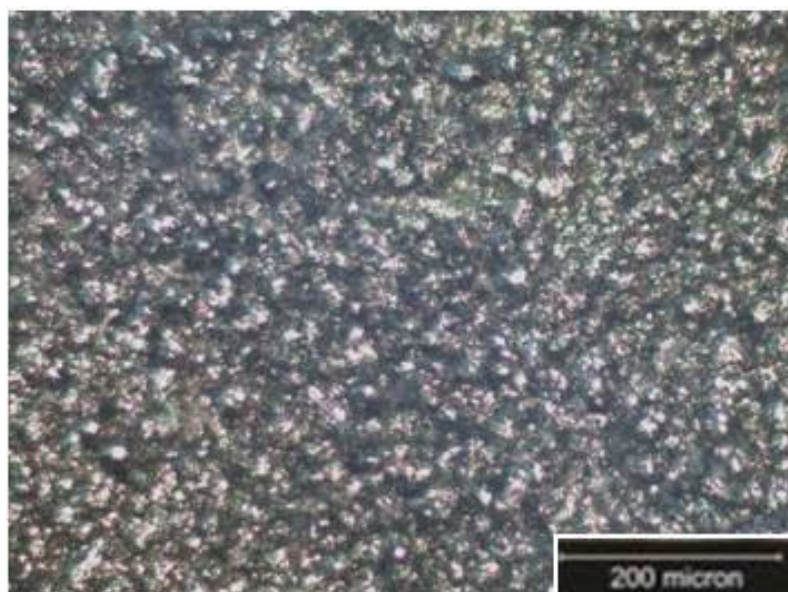
После загревања према условима датим стандардом узорци се излажу млазу хладне воде. Према захтевима стандарда превлака после испитивања мора да остане непромењена, не сме да дође до појаве одслојавања превлаке са основног материјала, подлоге. Преглед испитиваних узорака са карактеристикама подлоге дат је у табели 5.3.

Методом загревања испитивана је адхезија превлака цинка исталожених на подлогама добијеним на више начина, табела 5.3. Узорци на које је таложена превлака цинка су имали храпавост у распону од 0.075 до 2.330  $\mu\text{m}$  и тврдоћу од 16 до 43 HRC. После проведене процедуре дате стандардом, сви узорци су визуелно прегледани, што је захтев стандарда SORS 2325 [119], а потом и на оптичком микроскопу. На испитиваним узорцима није уочена појава одслојавања превлаке цинка од основног материјала.

Табела 5.3 Преглед испитиваних узорака методом загревања

Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке		Изглед превлаке
	Завршна обрада	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Дебљина превлаке, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	
22	Глодање	16	2.330	12.98	2.820	
33	Пескарење	38	1.510	21.57	1.840	
28	Брушење -грубо	43	0.990	28.96	1.140	
42	Брушење -грубо	23	0.840	10.54	1.180	
46	Брушење -фино	39	0.766	10.16	1.040	
23	Полирање	26	0.075	21.30	0.280	

На слици 5.19 приказан је изглед површине на једном од испитиваних узорака. Површина је чиста, нема никаквих дефеката и нежељених појава на превлаци.



Слика 5.19 Изглед површине превлаке после испитивања загревањем

На основу спроведених испитивања може се закључити да примењене технологије израде припремака за цинковање немају утицаја на приањање превлаке за основни материјал. Када је у питању подлога за таложење, битно је само њено стање. Са површина морају апсолутно бити одстрањене све нечистоће у било ком облику, масти, оксиди и други филмови.

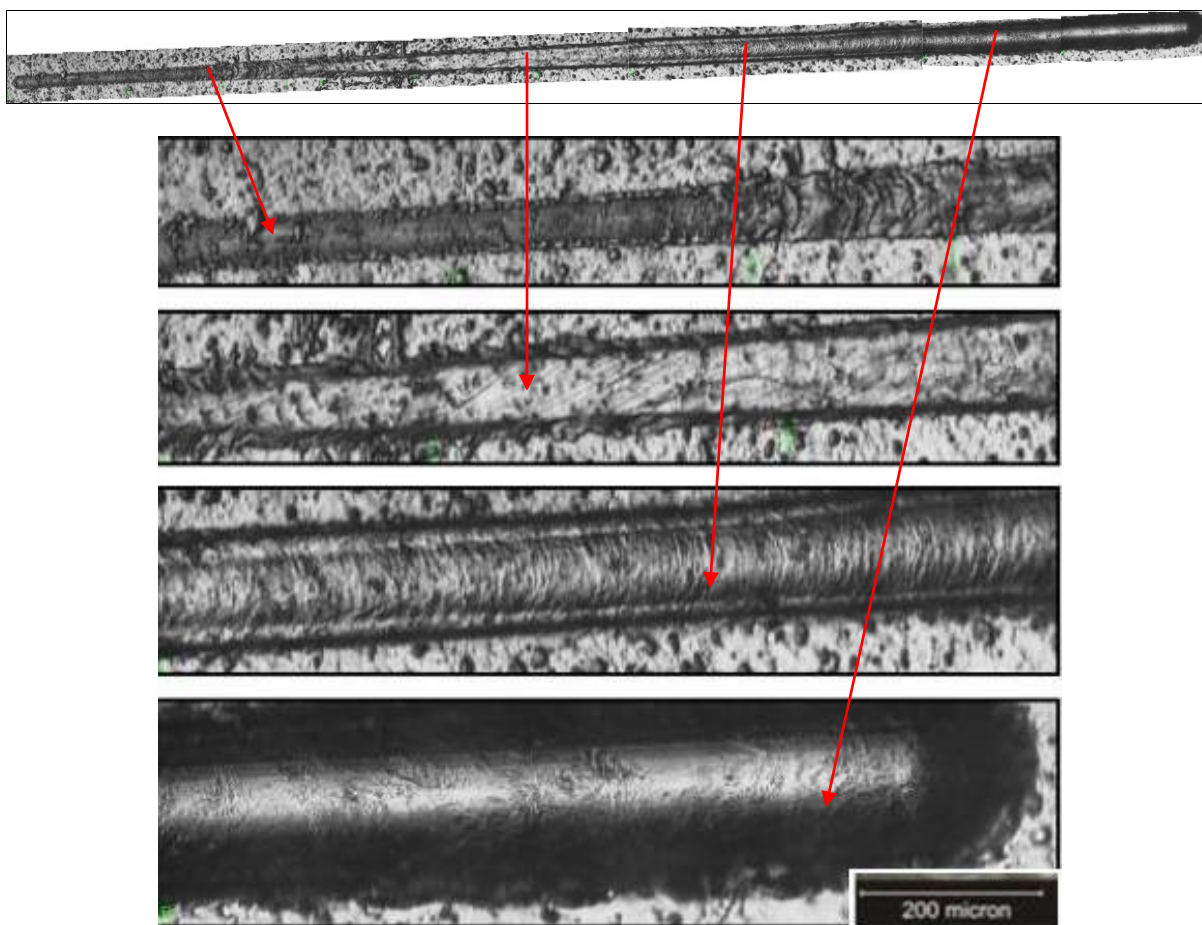
### 5.1.3.2 "Scratch" тест - превлака цинка

Тест браздањем је проведен на узорцима да би се добиле информације о чврстоћи везе подлоге и превлаке. Испитивање је извршено на уређају "*Scratch tester ST-99*", слика 4.23.

Испитивање је обављено са следећим параметрима:

- максимална нормална сила: 200 N,
- пораст силе 80 N/min,
- брзина кретања узорка: 40 mm/min,
- пут узорка: 9 mm.

Анализом резултата мерења трага хабања, слика 5.20, у условима константне брзине повећања нормалног оптерећења (80 N/min) и константној брзини клизања (40 mm/min) добијају се подаци о адхезионој отпорности, односно јачини адхезионих веза између превлаке и основног материјала.



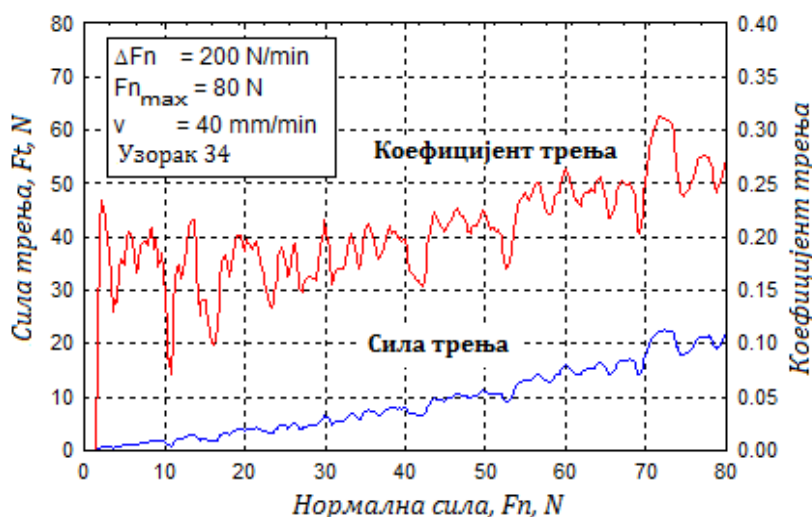
Слика 5.20 Траг "scratch" теста на превлаци цинка

Преглед испитиваних узорка са карактеристикама подлоге дат је у табели 5.4.

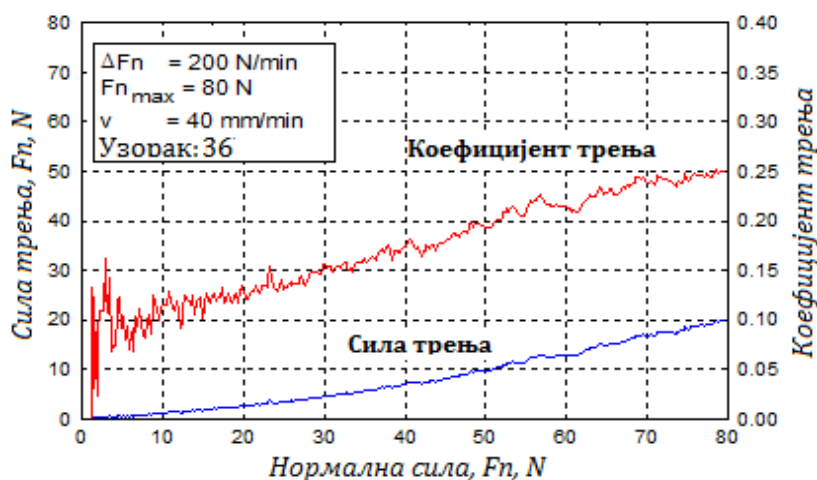
**Табела 5.4** Карактеристике узорака испитиваних методом "scratch" теста

Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке	
	Завршна обрада	Тврдоћа, HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
34	Глодање	30	3.030	16.70	3.190
36	Пескарење	30	1.430	13.46	1.746
41	Брушење-грубо	30	0.950	14.98	1.130
12	Брушење-фино	39	0.624	14.98	0.797
48	Брушење-фино	39	0.697	14.98	0.824
3	Полирање	28	0.097	14.22	0.241
13	Полирање	44	0.095	14.48	0.120
23	Полирање	18	0.075	21.30	0.280
24	Полирање	26	0.075	13.97	0.240

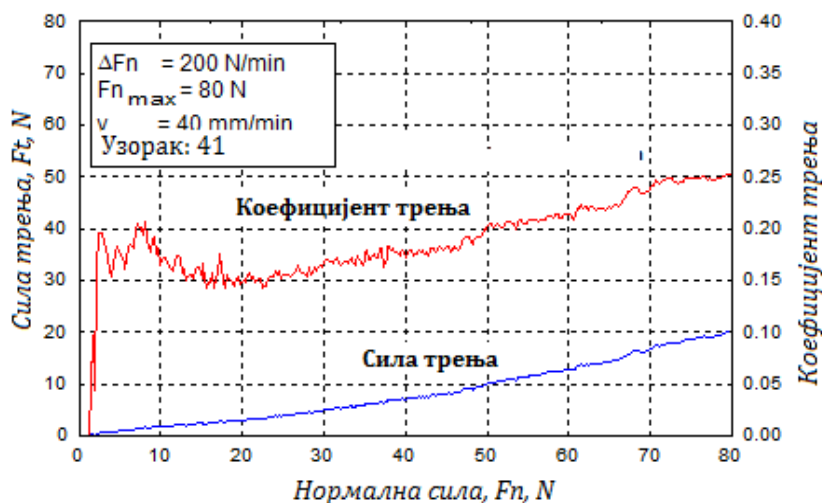
На сликама 5.21 – 5.28, дати су дијаграми "scratch" теста за испитиване узорке.



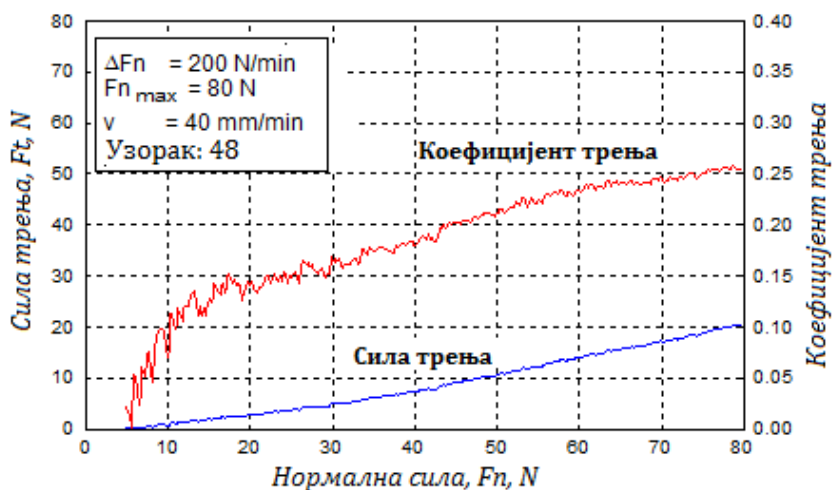
**Слика 5.21** Дијаграм "scratch" теста за узорак 34, завршна обрада подлоге, глодање



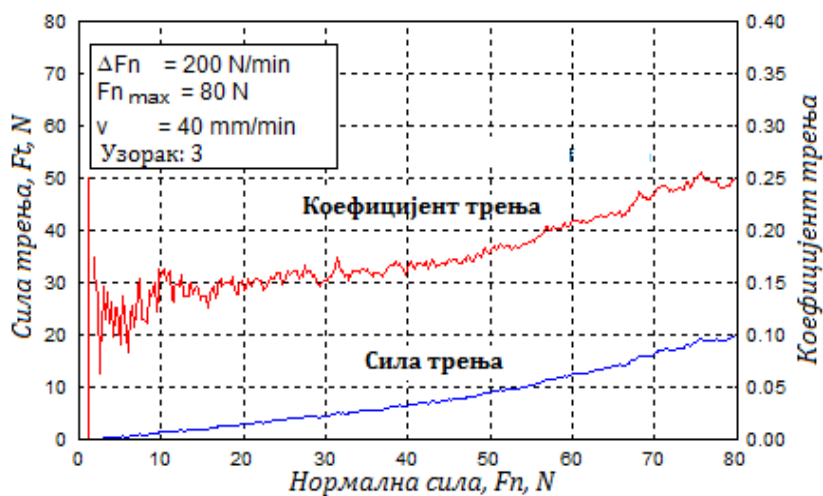
**Слика 5.22** Дијаграм "scratch" теста за узорак 36, завршна обрада подлоге, пескарење



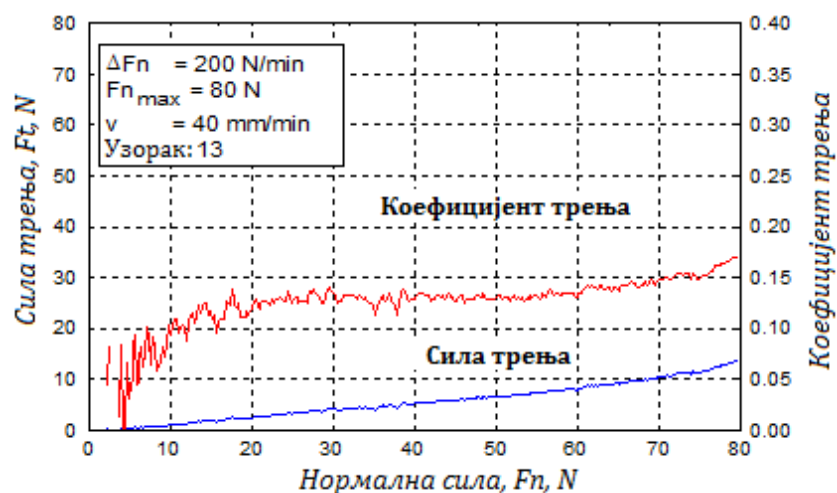
Слика 5.23 Дијаграм "scratch" теста за узорак 41, завршна обрада подлоге, грубо брушење



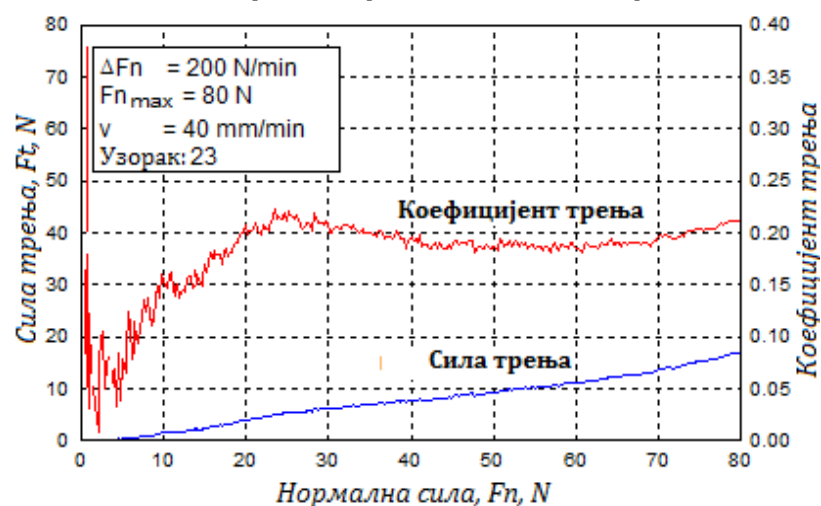
Слика 5.24 Дијаграм "scratch" теста за узорак 48, завршна обрада подлоге, фино брушење



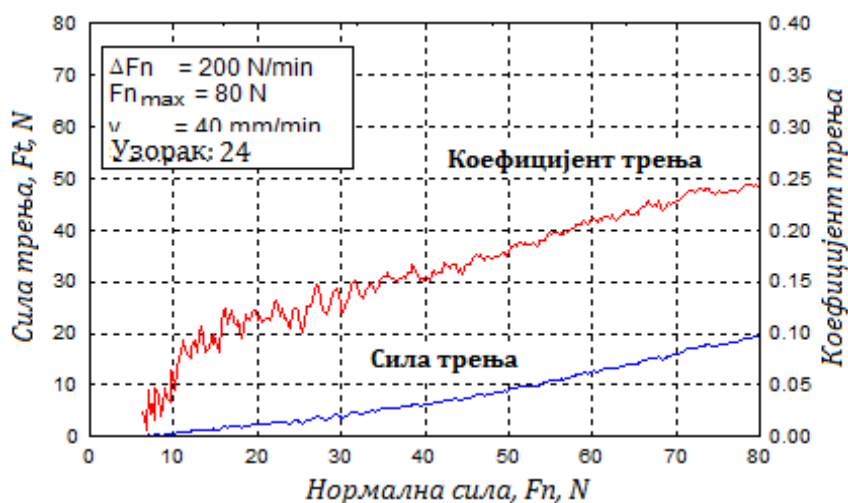
Слика 5.25 Дијаграм "scratch" теста за узорак 3, завршна обрада подлоге, полирање



Слика 5.26 Дијаграм "scratch" теста за узорак 13, завршна обрада подлоге, полирање

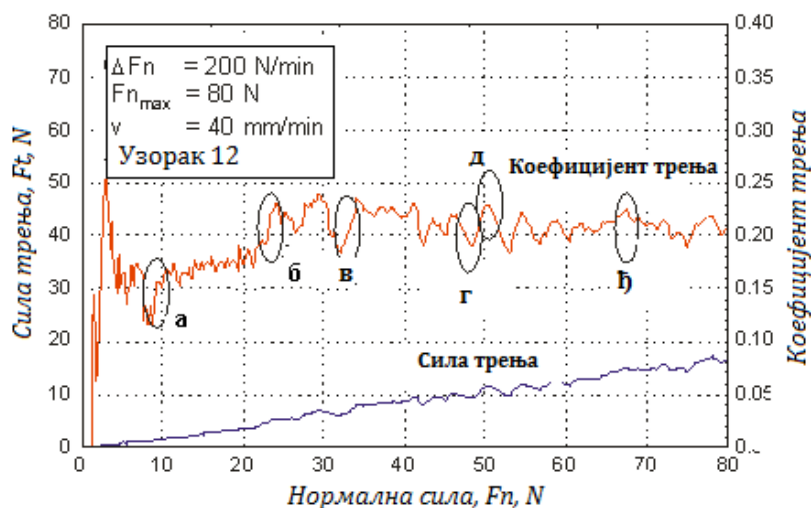


Слика 5.27 Дијаграм "scratch" теста за узорак 23, завршна обрада подлоге, полирање



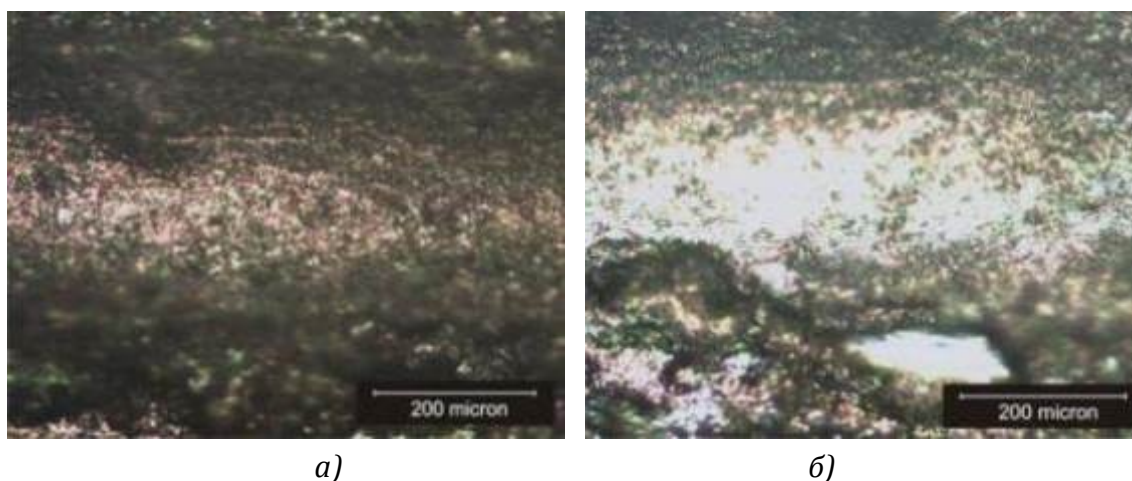
Слика 5.28 Дијаграм "scratch" теста за узорак 24, завршна обрада подлоге, полирање

На слици 5.29, приказан је сигнал "scratch" теста за узорак број 12 [66] који је детаљно анализиран. На дијаграму се уочавају карактеристична подручја са минималним, максималним или подручјима у којима долази до значајније промене вредности коефицијента трења. Ова подручја су тачно лоцирана и за њих су снимљене фотографије изгледа површине "scratch" трага.



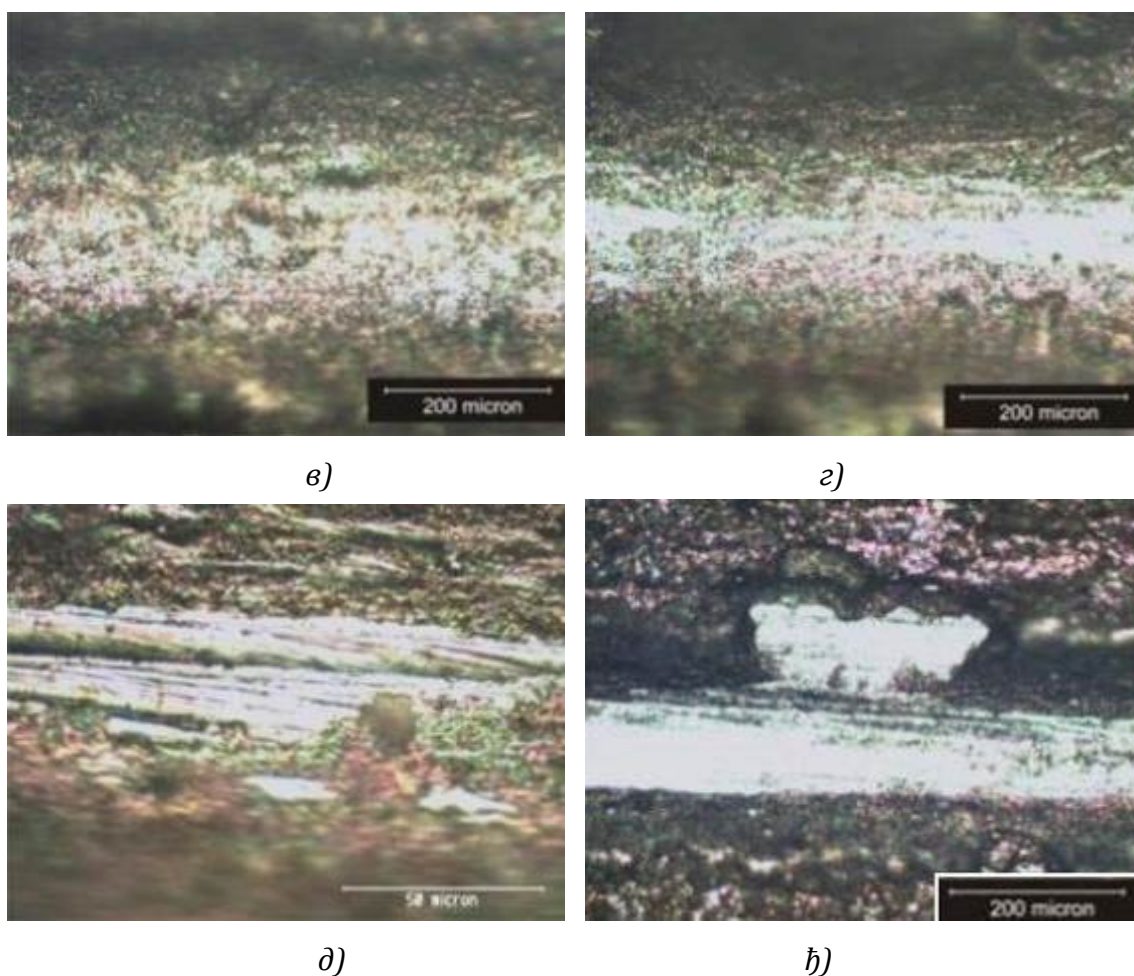
Слика 5.29 Дијаграм "scratch" теста за узорак број 12

На сликама 5.30, а-ђ, дати су изгледи површина на којима је дошло до деформације површинског слоја са превлаком Zn. На слици 5.30-а, види се почетак контакта игле scratch тестера са површином. При томе долази до одношења Zn са врхова неравнина или његовог утискивања у површину узорка. Слика 5.30-б, одговара положају б на дијаграму на слици 5.29, где се уочава значајнији пораст коефицијента трења. Са слике 5.30-б, се види да у овом случају долази до значајнијег одношења превлаке Zn и загревавања врха неравнине веће запремине.



Слика 5.30 Траг "scratch" теста на узорку број 12

Слика 5.30-в, одговара положају *в* на дијаграму (слика 5.29) где се уочава смањено оштећење превлаке *Zn* што је довело и до смањења коефицијента трења. То исто се може рећи и за положај *г* на слици, где се уочава веће и мање оштећење превлаке *Zn* и загревавање подлоге (основног материјала узорка). Лево и десно од ових подручја су светла места на сликама 5.30-в и г, што одговара контакту са основним материјалом. На слици 5.30-д, чији положај одговара локалном максимуму дијаграма на слици 5.29, уочава се значајније загревавање основног материјала, не само превлаке *Zn*.



**Слика 5.30** Траг "scratch" теста на узорку број 12

Слика 5.30-ђ, показује да је при достизању веће вредности нормалног оптерећења *F<sub>n</sub>* дошло до одношења превлаке *Zn* (светла површина трага) и да локални максимум одговара контакту игле "scratch" тестера са локалним испупчењем на површини узорка.

Детаљним прегледом (са различитим увећањима) површине трага насталог при "scratch" тесту уочава се да ни у једном случају није дошло до пуцања превлаке,



одвајања делића или трагова настанка љуспица. На бочним местима трага "scratch" теста уочава се истискивање материјала, првенствено Zn.



Слика 5.31 Истискивање материјала превлаке цинка

На слици 5.31, приказан је профил површине непосредно до краја трага игле "scratch" теста, где се јасно види да је дошло до истискивања превлаке Zn. Ово истискивање је значајније код превлака већих дебљина.

Када је у питању "scratch" тест реализована испитивања су показала да се ова метода не може са успехом користити за испитивање адхезионих својстава превлака цинка исталожених електрохемијским путем. Овом методом испитивања не може се утврдити сила потребна за одвајање превлаке од подлоге. Превлаке цинка имају малу тврдоћу, због чега при испитивању долази до одношења превлаке или утискивања у неравнине подлоге [65, 66].

#### 5.1.4 Испитивање корозије

Корозиона стабилност превлака цинка одређивана је по методи континуалног урањања у раствор натријум хлорида (према SORS 1633, [118]).

Услови испитивања: Узорци се постављају у посуду за испитивање тако да њихов горњи део буде најмање 50 mm испод нивоа раствора и да не додирује зидове и дно посуде. За испитивање се узима најмање 20 cm<sup>3</sup> раствора по једном cm<sup>2</sup> површине испитиваног узорка. Узорци се континуално држе у раствору 192 сата (време дато стандардом испитивања), после чега се ваде и оцењују визуелно.













У табели 5.5, приказани су испитивани узорци. Визуелним прегледом се утврђује:

- да ли је уопште дошло до корозије,
- да ли је она захватила читаву површину или само један део,

- да ли су настали чврсти производи корозије, које су боје, имају ли облик филма или љуски.

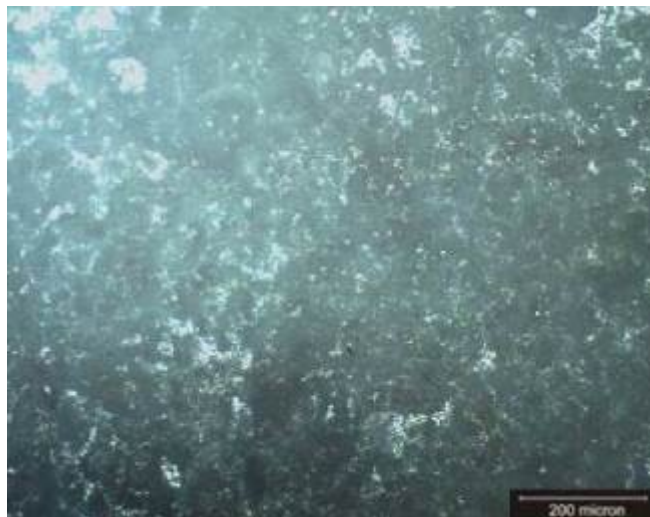
При испитивању на превлаци цинка без накнадне обраде, не дозвољава се појава црвено-мрких тачкица (које представљају корозију основног материјала) видљивих голим оком, у току временског интервала датог стандардом. Визуелни преглед прате и фотографије узорака, чиме се повећава егзактност прегледа. Потврду визуелног прегледа даје микроскопско испитивање, односно снимање морфологије.

**Табела 5.5** Изглед узорака после испитивања на корозију

Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3	Узорак 4
 $Ra=0,433, \delta=13\mu m$	 $Ra=0.490, \delta=15\mu m$	 $Ra=1.256, \delta=15\mu m$	 $Ra=1.133, \delta=18\mu m$
Узорак 5	Узорак 6	Узорак 7	Узорак 8
 $Ra=0.473, \delta=25\mu m$	 $Ra=2.180, \delta=26\mu m$	 $Ra=0.343, \delta=27\mu m$	 $Ra=0.938, \delta=29\mu m$
Узорак 9	Узорак 10	Узорак 11	Узорак 12
 $Ra=1.033, \delta=30\mu m$	 $Ra=1.360, \delta=30\mu m$	 $Ra=1.900, \delta=31\mu m$	 $Ra=0.923, \delta=32\mu m$
<b>Напомена:</b>			
На свим узорцима се виде трагови белих соли, што је дозвољено.			
Нема продуката корозије видљивих голим оком.			

На слици 5.32а, приказана је морфологија превлаке цинка после извршене корозионе постојаности у трајању од 192 сата према стандарду СОРС 1633 [118].

На превлаци нема продуката корозије видљивих голим оком тако да превлака задовољава услове прописане овим стандардом. На слици 5.32б, дата је морфологија исте превлаке после испитивања од 320 сати. На превлаци је уочено неколико тамно црвених мрља корозије, које нису видљиве голим оком што је захтев стандарда.



*а) Изглед превлаке после 192 сата стајања у раствору NaCl*



*б) Изглед превлака после 320 сати стајања у раствору NaCl*

*Слика 5.32 Изглед превлаке после испитивања корозионе стабилности*

### **5.1.5 Триболошка испитивања превлака цинка**

Испитивања хабања превлака цинка су вршена на трибометру TP- 95 са контактом "block-on-disk" у условима са подмазивањем [37]. Развој процеса хабања на блоку манифестује се формирањем и ширењем трага хабања. Испитивање је обављено са следећим параметрима:

- Нормално оптерећење 7 N,
- брзина клизања 25 m/s,
- пут клизања 100 m.

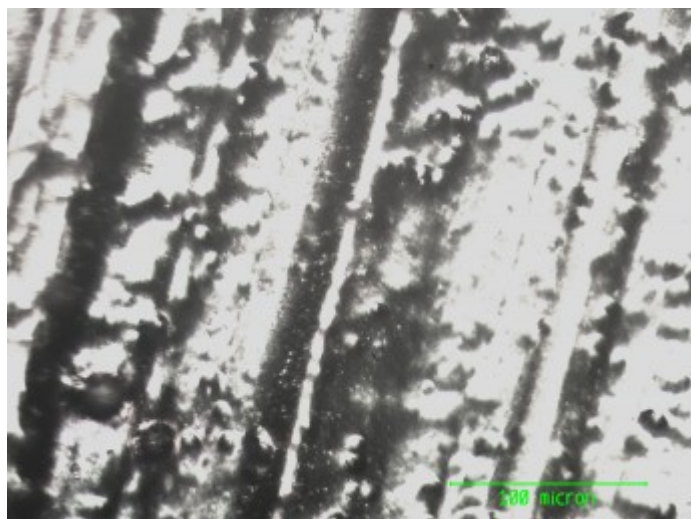
Реализована испитивања су била са граничним подмазивањем са минералним хидрауличним уљем *Хидровиск ХД-46*, због великог коефицијента трења у случају трења без подмазивања и великих вибрација у систему мерења силе трења код трибометра ТР-95.

У табели 5.6 приказани су резултати триболошких испитивања, коефицијент трења и ширина трага хабања узорака са превлаком цинка.

**Табела 5.6** *Ширина трага хабања и коефицијент трења*

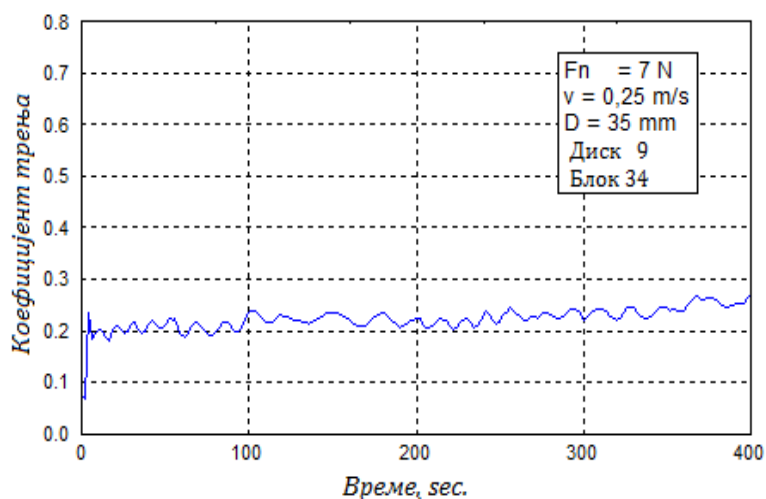
Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке		Коефицијент трења	Ширина трага хабања, mm
	Врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$		
34	Глодање	30	3.030	16.70	3.190	0.27	0.983
19	Пескарење	41	1.490	23.18	1.780	0.32	0.800
36	Пескарење	30	1.430	13.46	1.746	0.30	0.852
50	Пескарење	17	1.390	15.24	1.650	0.31	0.790
41	Брушење-грубо	30	0.950	14.98	1.130	0.23	0.962
32	Брушење-фино	16	0.700	13.97	0.930	0.31	0.970
48	Брушење-фино	39	0.697	13.46	0.824	0.31	1.000
15	Брушење-фино	17	0.676	12.70	0.780	0.29	0.983
3	Полирање	28	0.097	14.22	0.241	0.31	0.982
13	Полирање	44	0.095	14.48	0.120	0.31	1.015
23	Полирање	26	0.075	21.30	0.280	0.29	1.010
24	Полирање	18	0.075	13.97	0.240	0.32	1.030

Вредности коефицијента трења се крећу у распону од 0.23 до 0.32. Вредности коефицијента трења су уједначене, осим за превлаке исталожене на подлогама добијеним глодањем и грубим брушењем које су доста храпаве. Пошто је испитивање обављено у условима са подмазивањем, уље попуњава неравнине настале механичком обрадом (топографија ових превлака прати топографију подлоге), слика 5.33, и стварају се услови хидродинамичког подмазивања делова у контакту диска и испитиваног блока. Последица ове појаве је нижа вредност коефицијента трења превлака цинка исталожених на подлогама добијеним овим технологијама.

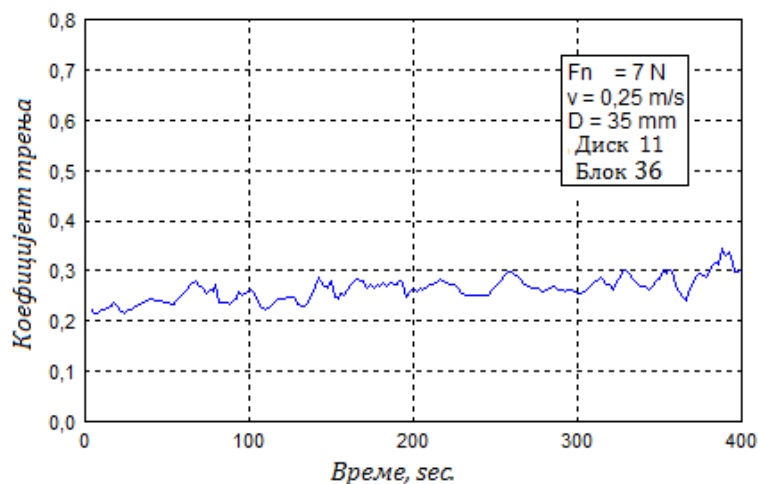


Слика 5.33 Изглед превлаке цинка исталожене на глодаој подлози

Примери сигнала коефицијента трења за неке од испитиваних узорке приказани су на слици 5.34.

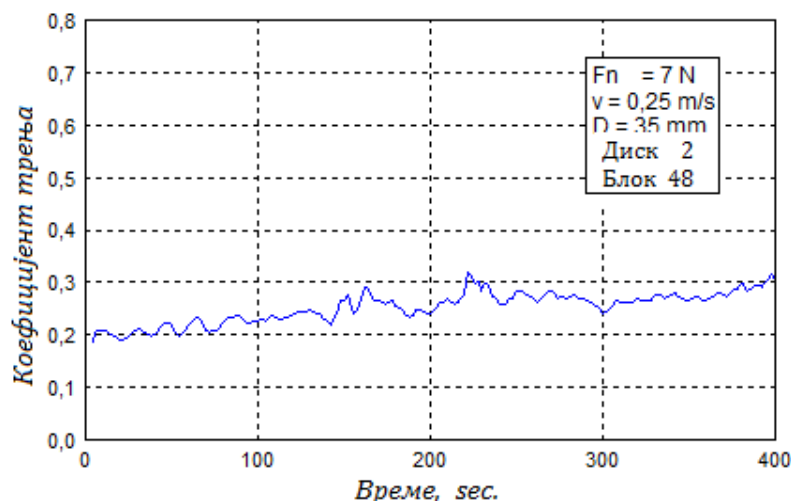


а) Узорак 34, завршна обрада подлоге, глодање

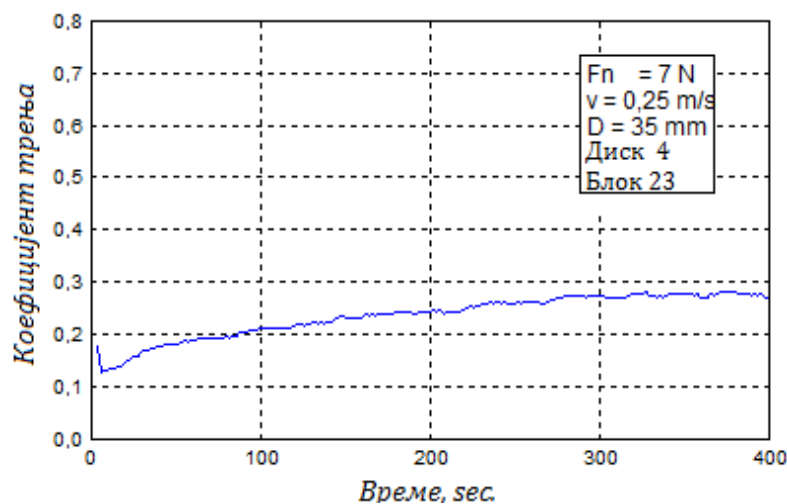


б) Узорак 36, завршна обрада подлоге, пескарење

Слика 5.34 Сигнал коефицијента трења превлаке цинка



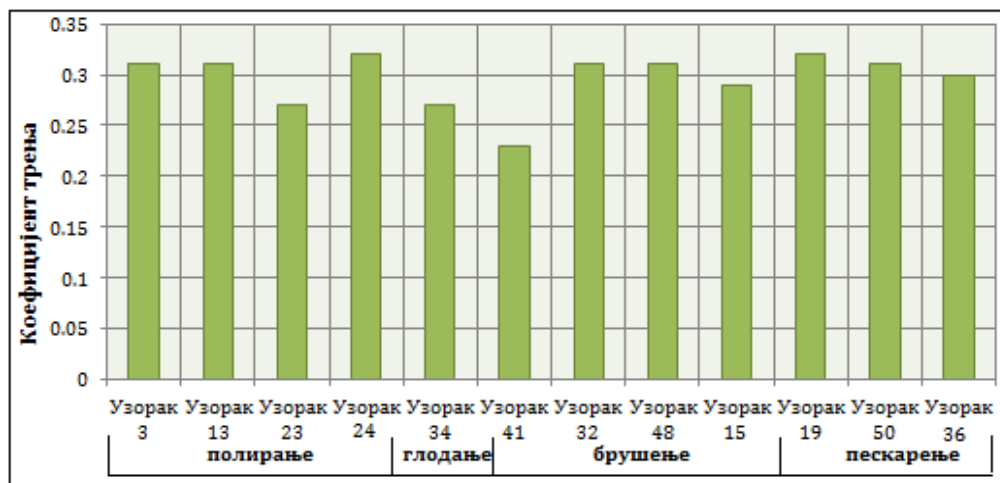
в) Узорак 48, завршна обрада подлоге, брушење



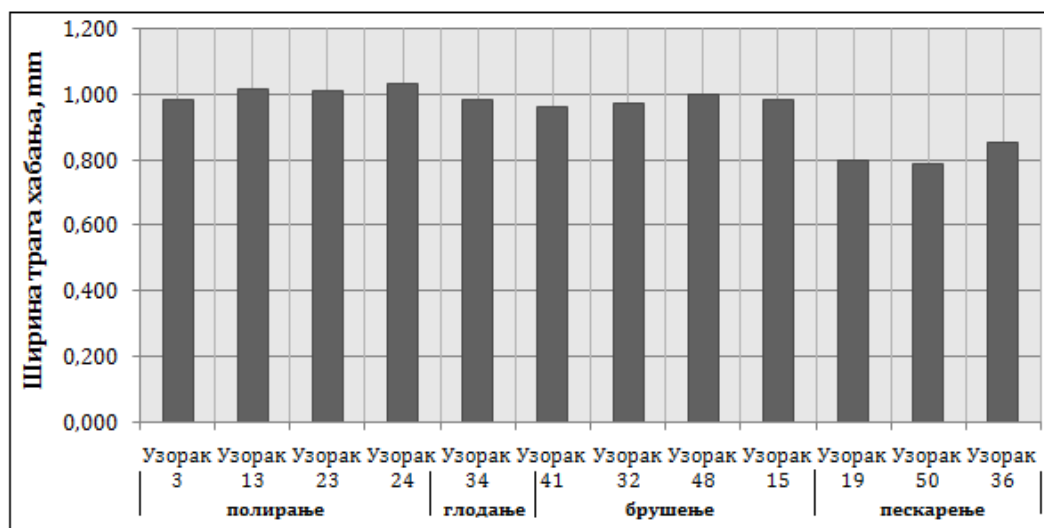
г) Узорак 23, завршна обрада подлоге, полирање

**Слика 5.34** Сигнал коефицијента трења превлака цинка, наставак

Графички приказ коефицијента трења и ширине трага хабања узорака са превлаком цинка показан је сликама 5.35 и 5.36.



**Слика 5.35** Коефицијент трења превлака цинка



Слика 5.36 Ширина трага хабања на превлакама цинка

Паралелно са праћењем промене коефицијента трења праћен је и процес хабања блока у условима трења са подмазивањем. Као параметар хабања коришћена је ширина трага хабања на контактної површини испитиваног блока (слика 4.9).

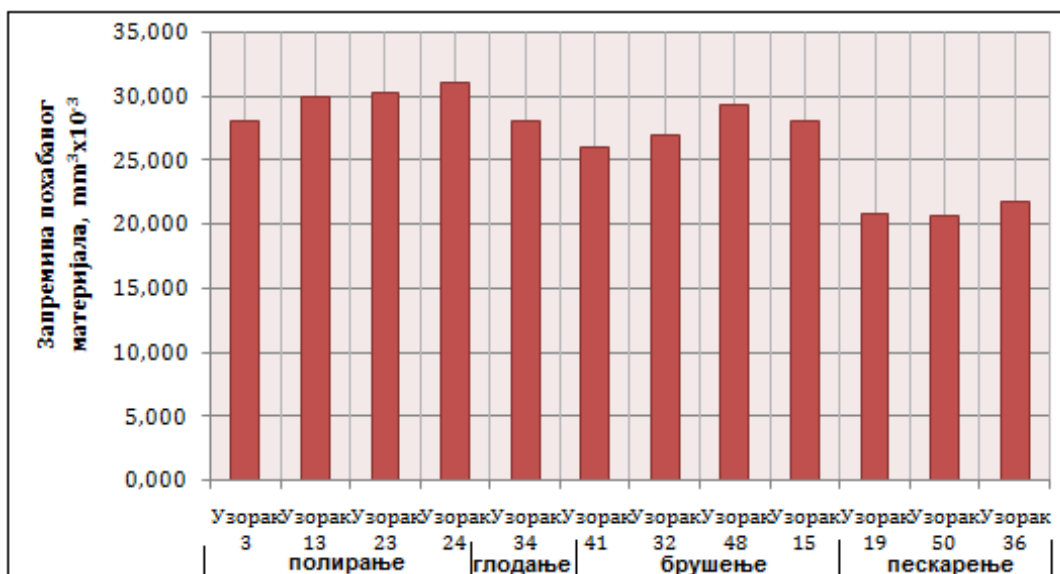
Развој процеса хабања на блоку манифестује се формирањем и ширењем трага хабања. Почетни номинални линијски контакт услед развоја процеса хабања постаје контакт по одређеној површини, што као последицу има разарање материјала делова у контакту, блока и диска. Пошто дискови коришћени за ова испитивања имају много већу тврдоћу од цинка, током испитивања није дошло до појаве њиховог хабања. Промена ширине трага хабања има исти карактер за све испитиване узорке само је разлика у нивоу њихове похабаности. Испитиване превлаке таложене су на подлогама различитих карактеристика (храпавост и тврдоћа подлоге). Превлаке такође имају различите карактеристике (храпавост и дебљину). Ако се посматрају добијени хистограми, може се закључити да се између храпавости површина узорака пре и после наношења превлаке цинка и ширине трага хабања на блоку не може успоставити веза. Када се анализира утицај технологија обраде узорака за таложење превлака (брушење, полирање, пескарење и др.) запажа се да је ширина трага хабања најмања код превлака исталожених на пескареној подлози [43, 45]. Стање површине за таложење превлака цинка нема утицај на ширину трага хабања. Превлака цинка у овом случају представља технолошку баријеру. Отпорност на хабање превлака цинка је одређена на основу запремине похабаног материјала. Вредности запремине похабаног материјала за превлаке цинка приказане су у табели 5.7. Највећа

похабаност је код превлака таложених на полираним површинама а најмања код превлака таложених на пескареним површинама. Превлаке исталожене на полираним површинама имају малу храпавост и контакт са диском се остварује по већој површини. Код превлака исталожених на пескареним површинама контакт са диском се остварује по врховима неравнина (ове превлаке имају вишу храпавост) па је запремина похабаног материјала мања.

**Табела 5.7** Запремина похабаног материјала  $\text{mm}^3 \times 10^{-3}$

Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке		Запремина похабаног материјала, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}$
	Врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	
34	Глодање	30	3.030	16.70	2.280	28.0095
19	Пескарење	41	1.490	23.18	1.780	20.8895
36	Пескарење	30	1.430	13.46	1.746	21.7860
50	Пескарење	17	1.390	15.24	1.650	20.7874
41	Брушење-грубо	30	0.950	14.98	1.130	26.2522
32	Брушење-фино	16	0.700	13.97	0.930	26.9127
48	Брушење-фино	39	0.597	13.46	0.824	29.4882
15	Брушење-фино	17	0.676	12.70	0.780	28.0095
3	Полирање	28	0.097	14.22	0.241	27.9241
13	Полирање	44	0.095	14.48	0.120	30.1895
23	Полирање	26	0.075	21.30	0.380	30.3818
24	Полирање	18	0.075	13.97	0.240	31.2229

Графички приказ запремине похабаног материјала дат је на слици 5.37.



**Слика 5.37** Запремина похабаног материјала превлака цинка



## 5.2 Превлаке хрома

Спољни изглед превлаке хрома оцењиван је визуелно на дневној светлости под углом од 45°. Како је таложење извршено у области сјајног хрома (на температури електролита 55°C, уз промену струје густине од 30-60 A/dm<sup>2</sup>), добијене су сјајне превлаке. На површини превлака уочен је ивични ефекат [73, 74, 75]. Присуство ивичног ефекта потврдили су и резултати мерења дебљине превлака.

**Табела 5.8** Преглед узорака са превлакама хрома

Узорак број	Карактеристике подлоге			Параметри таложења		Карактеристике превлаке	
	Врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Густина струје, A/dm <sup>2</sup>	Време min	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
56	Брушење, режим A <sub>1</sub>	32	0.850	30	180	24.76	1.130
60	Брушење, режим A <sub>1</sub>	34	0.870			28.96	1.171
63	Брушење, режим A <sub>1</sub>	42	0.820			19.50	1.200
67	Полирање	39	0.650			19.00	0.820
71	Брушење, режим A <sub>2</sub>	34	1.020			23.00	1.168
74	Брушење, режим A <sub>2</sub>	40	0.880			22.00	1.171
79	Брушење, режим A <sub>2</sub>	41	0.964			23.70	1.171
81	Брушење, режим A <sub>2</sub>	37	0.966			27.00	1.288
82	Брушење, режим A <sub>2</sub>	36	1.013			20.59	1.380
83	Брушење, режим A <sub>2</sub>	39	0.970			24.76	1.210
85	Брушење, режим A <sub>2</sub>	34	0.926			26.16	1.288
110	Брушење, режим A <sub>3</sub>	36	0.880			23.8	1.140
112	Брушење, режим A <sub>4</sub>	36	0.870			22.48	1.142
118	Брушење, режим A <sub>4</sub>	20	0.890			26.16	1.176
129	Брушење, режим A <sub>4</sub>	41	0.830	30.00	1.185		
53	Полирање	32	0.480	30	360	32.50	0.640
64	Брушење, режим A <sub>1</sub>	33	0.669			41.30	0.830
65	Полирање	30	0.457			33.86	0.600
70	Полирање	34	0.500			38.00	0.640
77	Полирање	39	0.476			40.48	0.570
86	Полирање	41	0.480			38.96	0.800
88	Брушење, режим A <sub>4</sub>	32	1.150			40.48	1.340
91	Полирање	41	0.368			42.26	0.530
92	Брушење, режим A <sub>3</sub>	35	1.230			34.00	1.600
96	Брушење, режим A <sub>3</sub>	41	1.330			43.00	1.680
97	Брушење, режим A <sub>4</sub>	41	1.120			36.16	1.380
100	Брушење A <sub>3</sub>	40	1.040			46.57	1.371
102	Брушење, режим A <sub>3</sub>	41	1.260			40.00	1.510
104	Брушење, режим A <sub>4</sub>	39	1.260			35.00	1.410
105	Полирање	33	0.447	30.57	0.770		

A<sub>1</sub> (n=2800 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 15 ход/мин)  
A<sub>2</sub> (n=2800 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 30 ход/мин)  
A<sub>3</sub> (n=1400 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 30 ход/мин)  
A<sub>4</sub> (n=1400 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 15 ход/мин)

Табела 5.8 Преглед узорак са превлакама хрома–наставак

Узорак број	Карактеристике подлоге			Параметри таложења		Карактеристике превлаке	
	Врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Густина струје A/dm <sup>2</sup>	Време min	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
51	Полирање	40	0.620	60	180	40.57	0.860
54	Брушење, режим A <sub>1</sub>	42	0.690			39.10	0.870
57	Брушење, режим A <sub>1</sub>	40	0.870			41.20	1.340
58	Брушење, режим A <sub>1</sub>	39	0.770			43.00	0.920
62	Брушење, режим A <sub>1</sub>	38	0.783			30.48	0.980
73	Брушење, режим A <sub>4</sub>	35	0.800			39.50	1.221
76	Брушење, режим A <sub>2</sub>	42	0.740			50.00	0.910
107	Брушење A <sub>4</sub>	41	0.910			43.70	1.300
108	Брушење, режим A <sub>4</sub>	41	0.780			41.90	0.915
113	Брушење, режим A <sub>3</sub>	31	1.090			36.16	1.417
114	Брушење, режим A <sub>4</sub>	41	0.770			39.80	0.960
115	Брушење, режим A <sub>2</sub>	21	0.950			43.80	1.371
116	Брушење, режим A <sub>2</sub>	31	0.950			41.90	1.290
119	Брушење, режим A <sub>3</sub>	40	0.990			40.10	1.371
121	Брушење, режим A <sub>4</sub>	41	0.800			43.70	1.310
124	Брушење, режим A <sub>3</sub>	40	0.940			39.70	1.390
59	Брушење, режим A <sub>1</sub>	22	0.830	60	360	61.00	1.230
69	Брушење, режим A <sub>1</sub>	36	0.670			80.25	0.930
75	Полирање	21	0.404			82.50	0.580
89	Брушење, режим A <sub>3</sub>	39	1.090			76.20	1.415
93	Полирање	28	0.690			76.20	0.868
94	Брушење, режим A <sub>2</sub>	39	0.990			88.90	1.368
95	Брушење, режим A <sub>3</sub>	39	1.270			48.26	1.400
101	Полирање	40	0.454			65.10	0.610
103	Брушење, режим A <sub>4</sub>	39	1.151			88.00	1.530
106	Полирање	39	0.462			78.90	0.637
109	Полирање	34	0.349			41.90	0.570
117	Полирање	34	0.409			79.90	0.605
122	Полирање	39	0.424			58.42	0.546
125	Брушење, режим A <sub>4</sub>	34	1.060			58.26	1.410
126	Брушење, режим A <sub>4</sub>	39	1.330			88.90	1.880
127	Полирање	22	0.420			76.20	0.520

A<sub>1</sub> (n=2800 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 15 ход/мин)  
A<sub>2</sub> (n=2800 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 30 ход/мин)  
A<sub>3</sub> (n=1400 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 30 ход/мин)  
A<sub>4</sub> (n=1400 о/мин., додаток за брушење 0.03, брзина стола: 15 ход/мин)

### 5.2.1 Мерење дебљине

Резултати мерења дебљине превлака хрома приказани су у табели 6.8. Мерење дебљине ових превлака је извршено на исти начин као и мерење дебљине превлака цинка. На основу резултата мерења дебљине превлака, према шеми приказаној на слици 5.1, урађени су графички модели расподеле дебљине превлака по површини узорака. У табели 5.9 приказана је расподела дебљине превлаке хрома по површини узорака добијених различитим технологијама механичке обраде. На графичким моделима (слике 5.38 - 5.42), урађеним на основу мерења дебљине јасно је просторно представљена слика расподеле превлаке по површини узорка.

**Табела 5.9** Распоред дебљине превлаке по површини узорка

Узорак број	Врста обраде	Програм таложења	x/y	1.5	4.5	7.5	10.5	13.5
129	Брушење, режим А <sub>4</sub>	4	1.5	31.10	30.20	29.80	29.50	30.00
			5	30.20	29.50	31.00	30.50	29.80
			8.5	30.20	30.00	31.00	29.60	30.00
100	Брушење, режим А <sub>3</sub>	2	1.5	44.00	44.00	45.00	44.00	45.00
			5	45.00	44.00	44.00	46.80	45.00
			8.5	46.80	46.50	46.50	45.00	46.00
94	Брушење, режим А <sub>2</sub>	4	1.5	91.00	88.00	85.00	88.00	90.00
			5	90.00	85.00	88.00	86.00	84.00
			8.5	89.00	86.00	86.00	90.00	91.00
54	Брушење, режим А <sub>1</sub>	3	1.5	40.00	37.00	37.00	39.00	38.00
			5	39.20	36.00	36.00	37.00	35.00
			8.5	38.00	37.00	37.00	37.00	40.00
122	Полирање	1	1.5	58.00	56.00	56.00	59.00	62.00
			5	58.00	56.00	56.00	57.00	55.00
			8.5	58.00	57.00	58.00	58.00	62.00

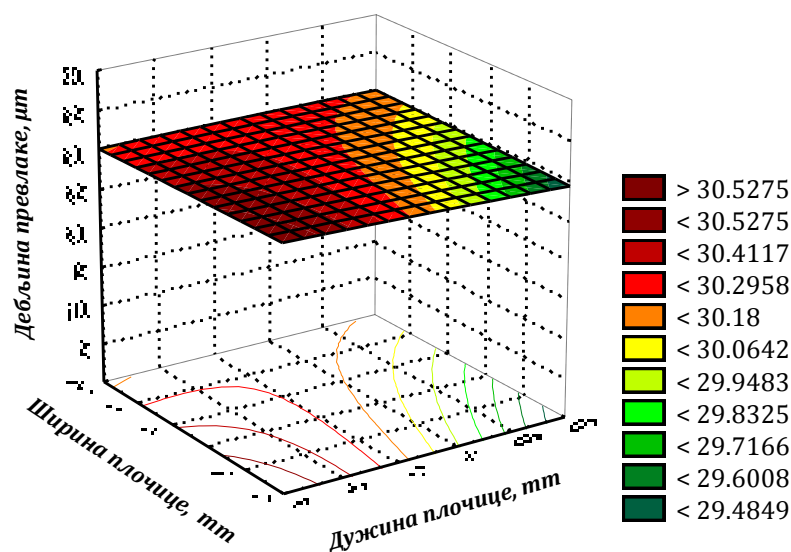
Дебљина је мерена на 15 места. Дебљина превлака зависно од програма таложења, кретала се у границама од 20  $\mu\text{m}$  до 90  $\mu\text{m}$ . Како је показано на сликама 5.39 - 5.43 дебљина превлаке је доста неравномерна. Неравномерна расподела дебљине превлаке по површини је последица неравномерне расподеле струје таложења по површини катоде, односно узорка на који се превлака таложи.

Према [52] фактори који изазивају неравномерност струје се деле у две групе:

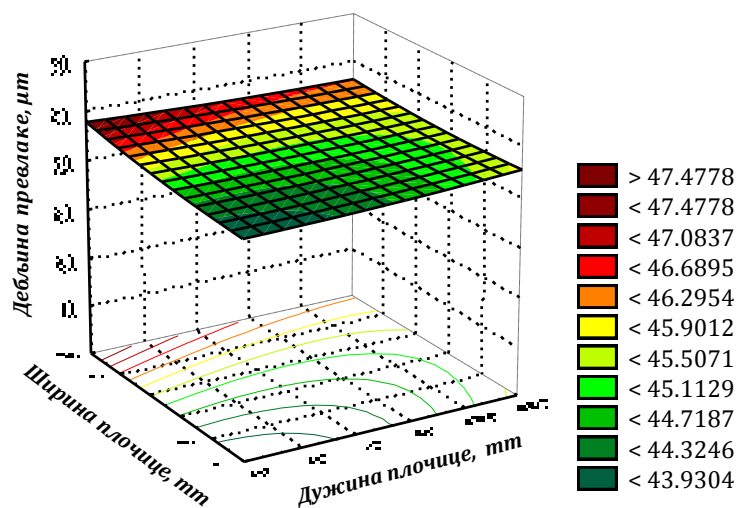
- електрохемијски фактори, који подразумевају нагиб поларизационе криве (промену катодног потенцијала у зависности од густине струје), електропроводљивост раствора и начин зависности искоришћења струје,
- геометријски фактори, у које спадају димензије и облик електролизера и електрода, међусобни положај електрода, као и њихов положај у односу на зидове електролизера.

Поред набројаног на расподелу струје и метала у почетном периоду електролизе велики утицај могу да имају и нехомогеност састава и структуре основног материјала-подлоге за таложење, врста припреме површине и низ других случајних фактора [49].

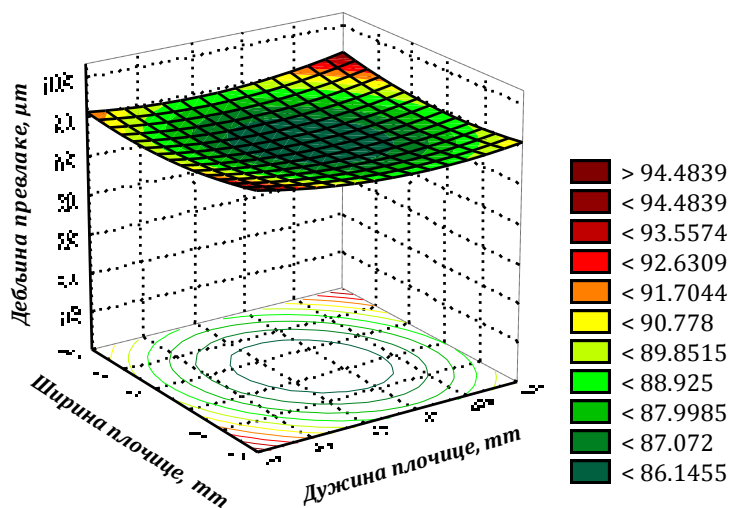
Код превлака таложених по програму таложења 3 и 4, (узорци 54, 94 и 122), највеће вредности за дебљину превлаке су измерене на колонама које полазе од ширине 1.5 mm и 13.5 mm (слика 5.3), које су дуж ивица узорака. Обзиром да су ове превлаке таложене са густином струје од  $60 \text{ A/dm}^2$  и имају јасно изражени ивични ефекат ово је логичан распоред дебљине. На свим узорцима који су таложени са густином струје од  $60 \text{ A/dm}^2$ , превлаке су уз увицу грубе и храпаве са израженим ивичним ефектом, што се поклапа са резултатима добијеним у истраживању [75].



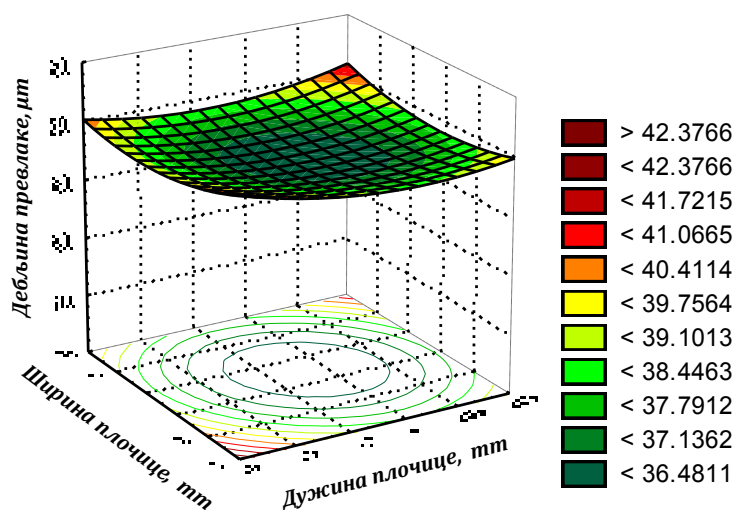
Слика 5.38 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 129



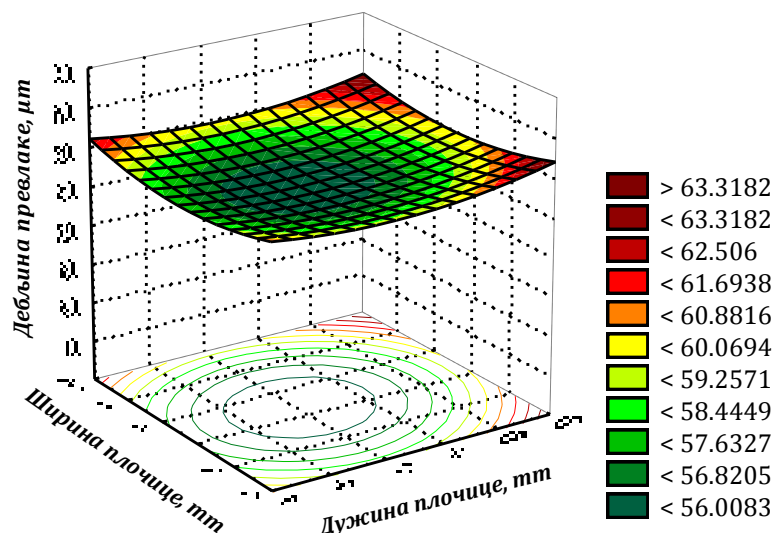
Слика 5.39 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 100



Слика 5.40 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 94



Слика 5.41 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 54



Слика 5.42 Расподела дебљине превлаке по површини узорка 122

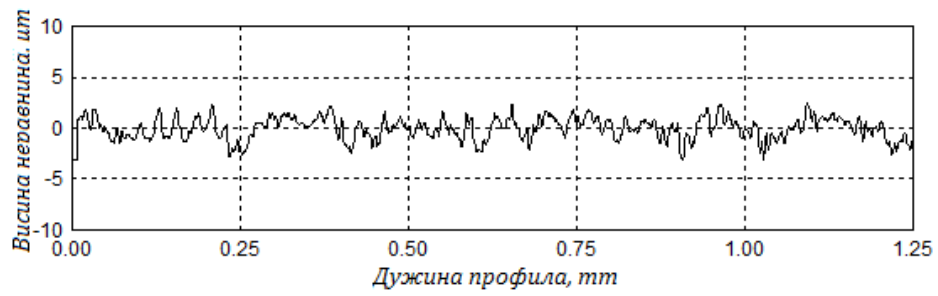
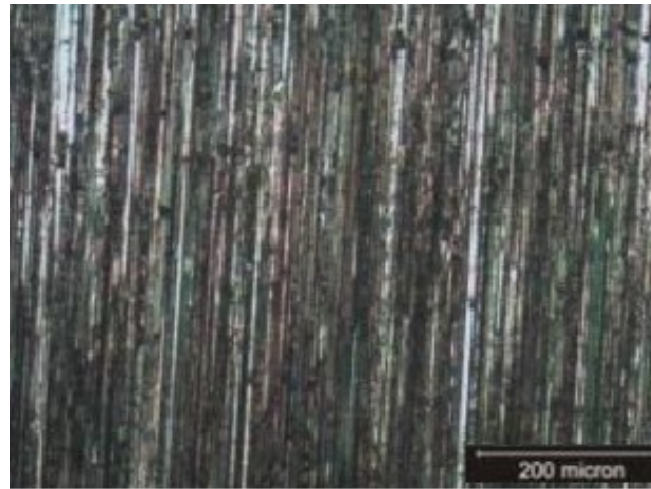
## 5.2.2 Морфологија превлака хрома

Као и превлаке цинка и превлаке хрома су подвргнуте испитивању оптичком и AFM микроскопијом. Испитивањем топографије превлака добијају се информације о величини кристалних агломерата, о присуству дефеката и укључака у талогу, као и о хомогености превлаке. Топографија површине превлаке утиче на њен сјај и отпорност према корозији [4, 5, 30].

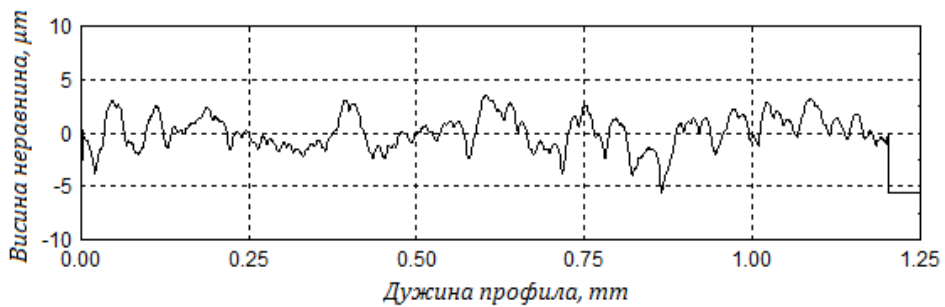
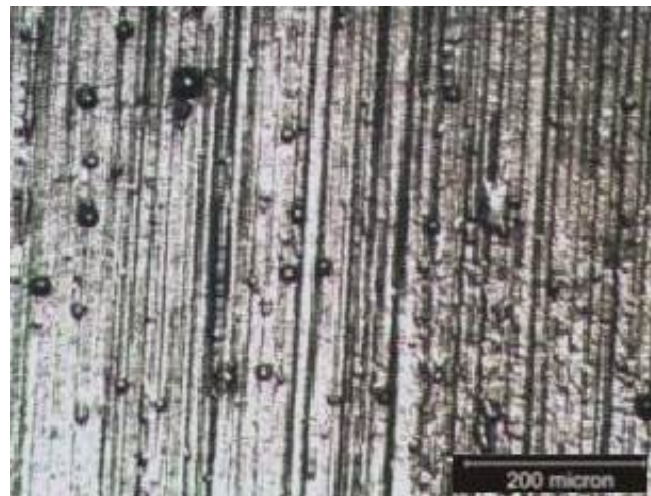
### 5.2.2.1 Анализа морфологије оптичким микроскопом

Структура испитиваних превлака посматрана је на металуршком микроскопу *Meiji Techno MT 8500* у Центру за трибологију на Факултету инжењерских наука (слика 5.8). Испитивање морфологије превлака хрома таложених једносмерном струјом при различитим густинама струје показала су да се морфологија мења са променом густине струје и времена таложења. Морфологија се мења са променом расподеле талога по површини узорака.

На сликама од 5.43 до 5.47, приказани су узорци пре и после наношења превлака. Превлаке су нанете на подлогу различите тврдоће и топографије. Вредности тврдоће и храпавости дате су у табели 5.8.

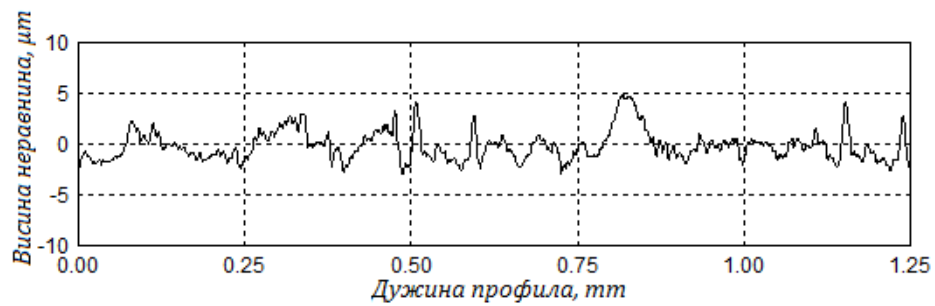
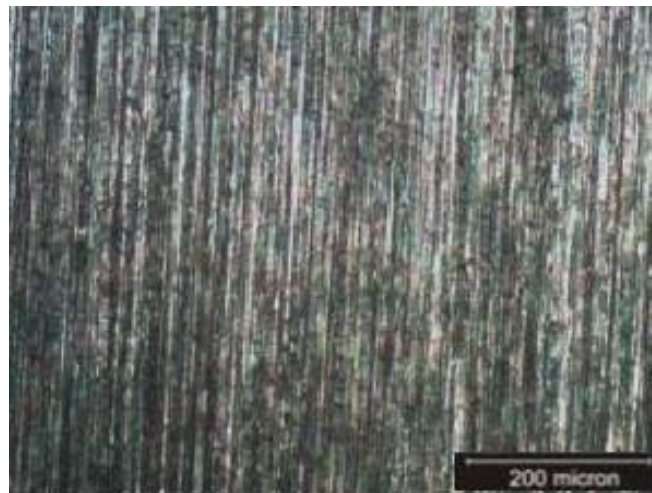


а- пре наношења превлаке  $Ra=0.870 \mu m$

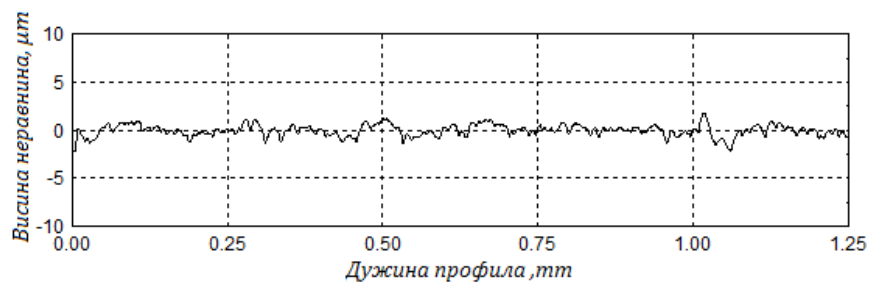


б- после наношења превлаке  $Ra=1.242 \mu m$

Слика 5.43 Узорак број 112, завршна обрада подлоге брушење-режим  $A_4$



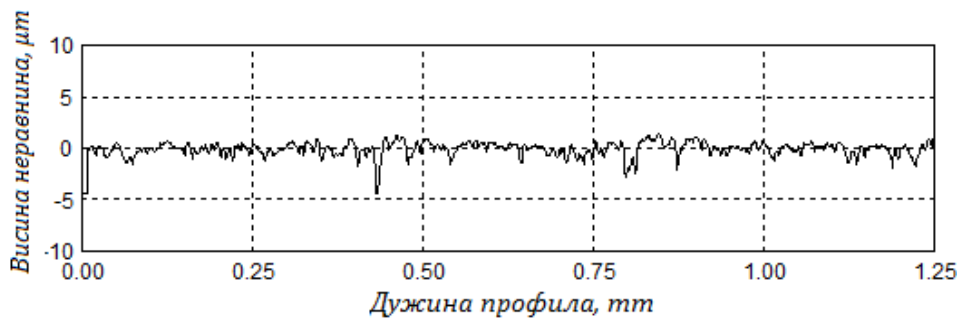
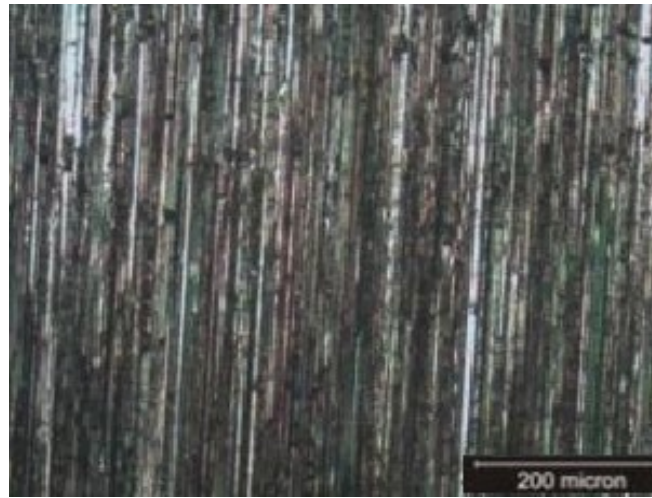
а- пре наношења превлаке  $Ra=1.230 \mu\text{m}$



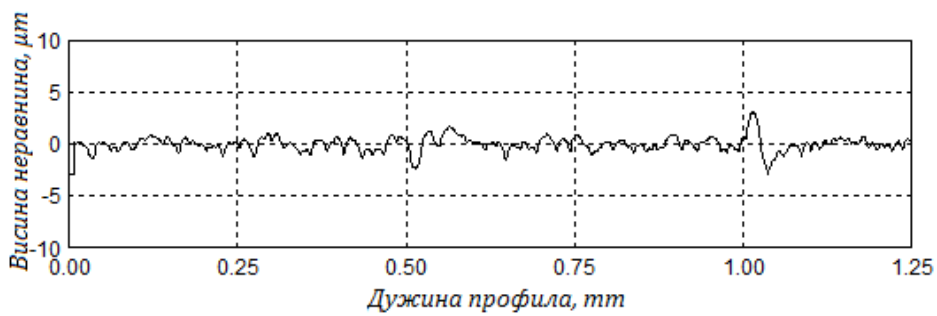
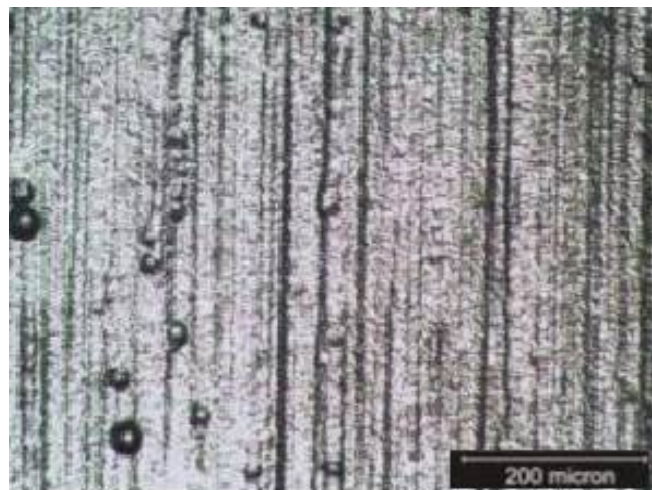
б- после наношења превлаке  $Ra=1.600 \mu\text{m}$

Слика 5.44 Узорак број 92, завршна обрада подлоге брушење-режим  $A_3$



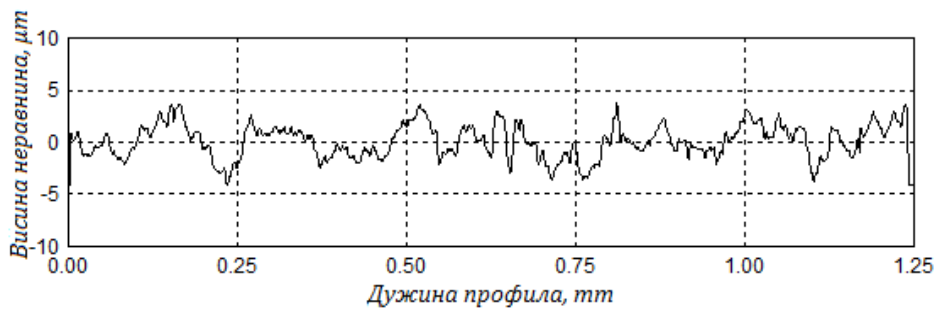
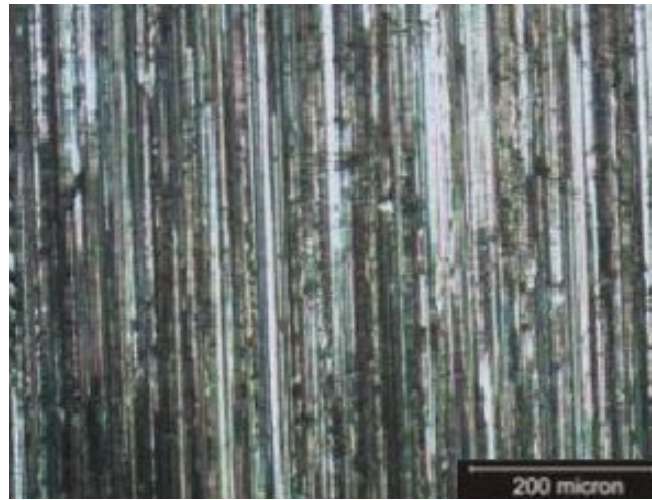


а- пре наношења превлаке  $Ra=1.013 \mu\text{m}$

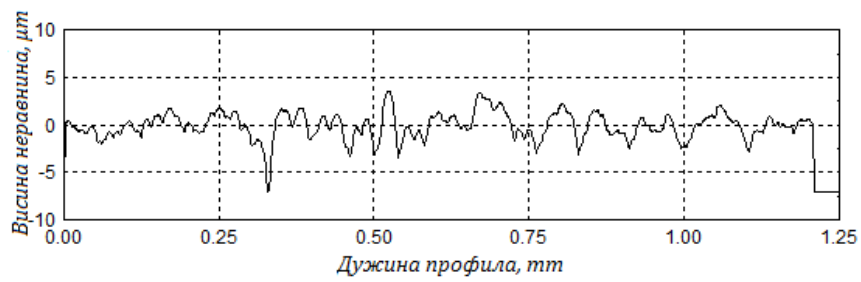
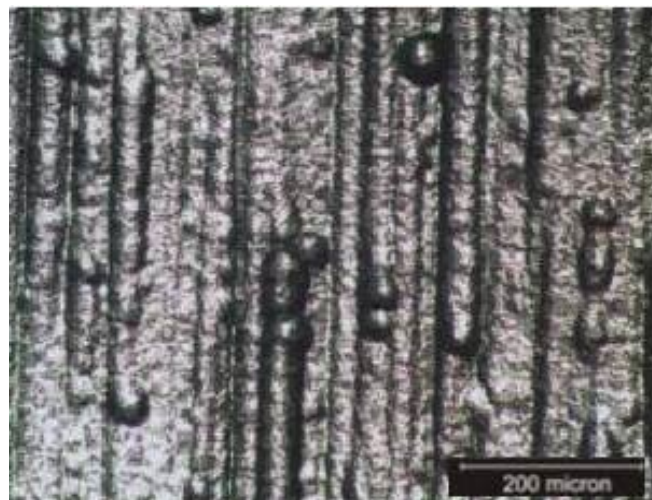


б- после наношења превлаке  $Ra=1.380 \mu\text{m}$

Слика 5.45 Узорак број 82, завршна обрада подлоге брушење-режим  $A_2$

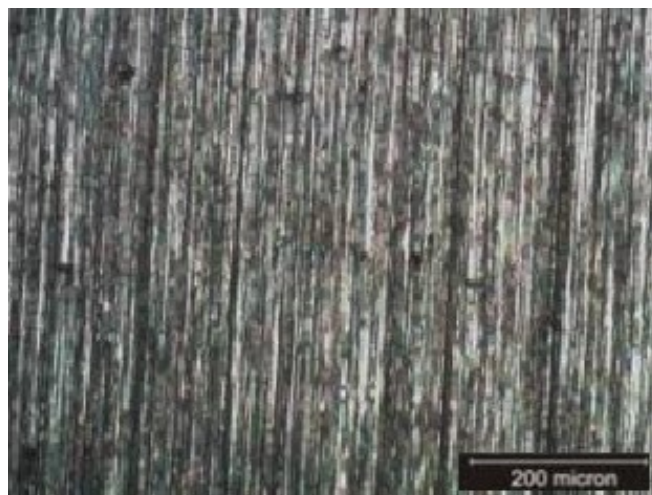


а- пре наношења превлаке  $Ra=0.990 \mu m$

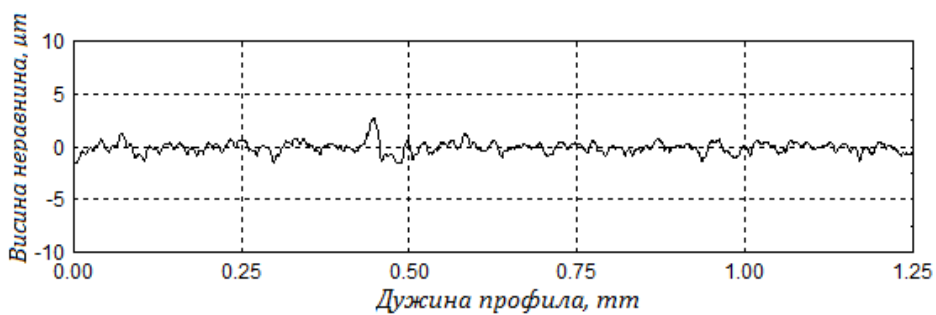
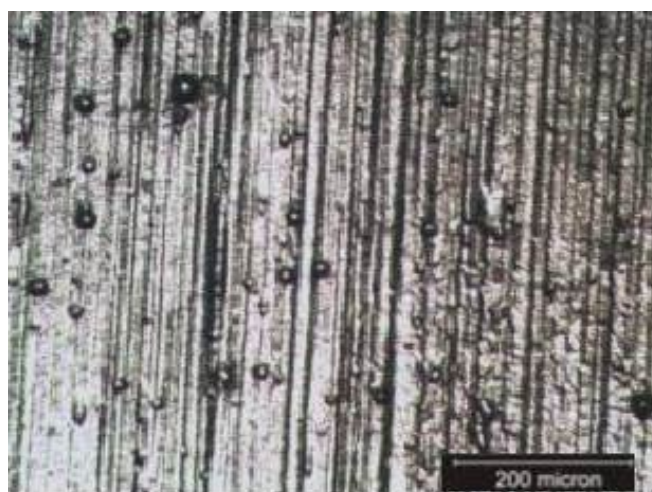


б- после наношења превлаке  $Ra=1.368 \mu m$

Слика 5.46 Узорак број 94, завршна обрада подлоге брушење-режим  $A_2$



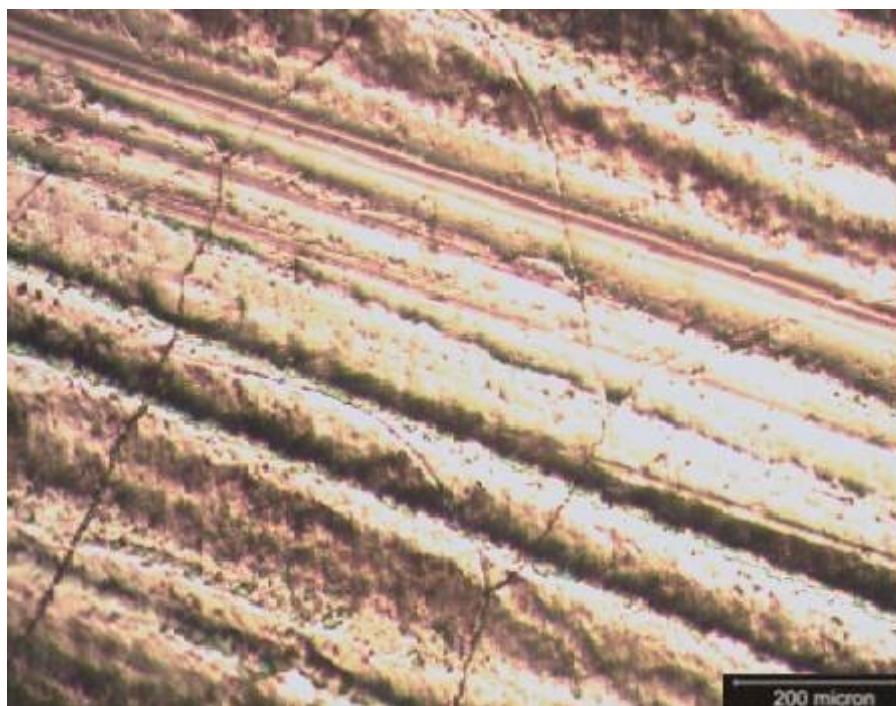
а- пре наношења превлаке  $Ra=0.457 \mu\text{m}$



б- после наношења превлаке  $Ra=0.600 \mu\text{m}$

Слика 5.47 Узорак број 65, завршна обрада подлоге полирање

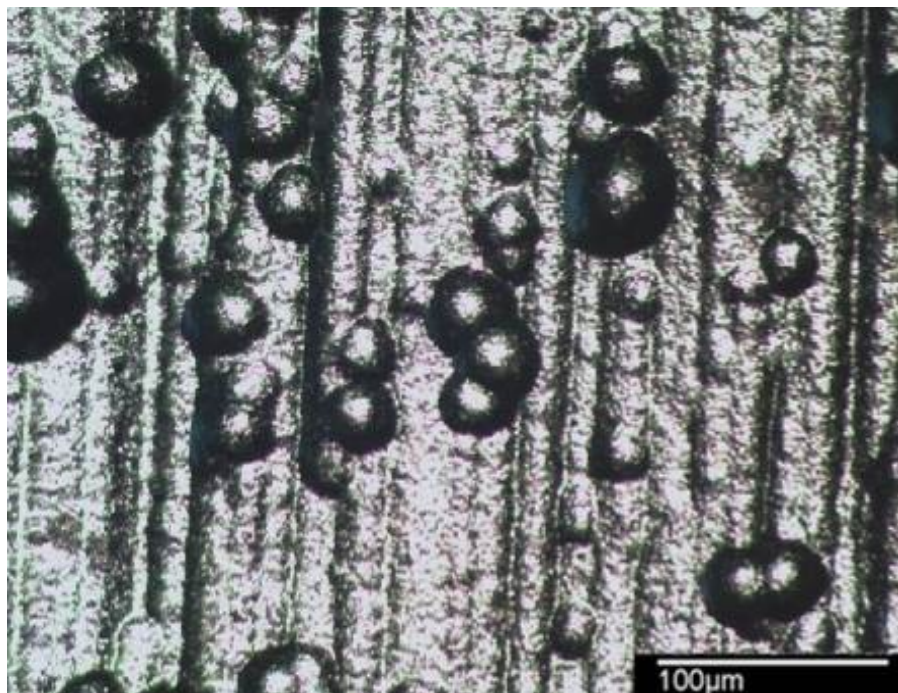
Превлаке сјајног хрома таложене из хроматно-сулфатног електролита прекривене су мрежом прскотина. Прскотине настају као последица великих унутрашњих напрезања услед смањења запремине због трансформације нестабилне  $\beta$  у стабилну  $\alpha$  модификацију. Уколико се превлака која се таложи састоји првенствено од кристала који чине  $\alpha$  модификацију, тада се распадом присутне мале количине  $\beta$  модификације образују крупне прскотине. Величина и број прскотина у превлаци битно утичу на њену постојаност и присуство укључака, што се одражава на механичка својства [81, 113].



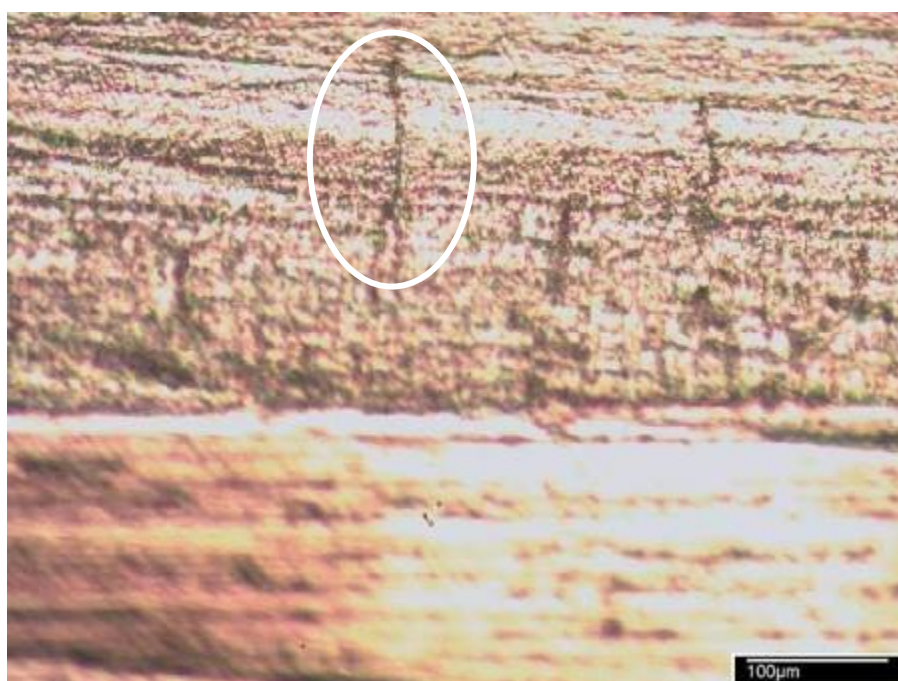
**Слика 5.48** Прскотине по површини превлаке хрома

Испитивања извршена оптичком микроскопијом показала су да се морфологија превлака хрома мења у зависности од места таложења на узорку и услова таложења. Код узорка таложених са струјом од  $30 \text{ A/dm}^2$ , на средишњем делу узорка превлака је чиста и сјајна са финим прскотинама, нема појаве ивичног ефекта и појава "трагова водоника" је мало распрострањена. Када су у питању превлаке таложене са струјом јачине  $60 \text{ A/dm}^2$ , са променом густине струје мења се и изглед превлаке, прскотине постају шире и бројније, слика 5.48. Морфологија се мења и са променом области дебљине на узорку. На средишњем делу узорка превлака је "чистија" са финим прскотинама док је према крајевима превлака грубља а ивични ефекат је јако изражен са повећаним прскотинама. Појава

"трагова водоника" је видљива скоро по целој површини док су у рубним подручјима узорка уочљива места њихове повећане концентрације, слика 5.49.



*Слика 5.49 Морфологија превлаке хрома*



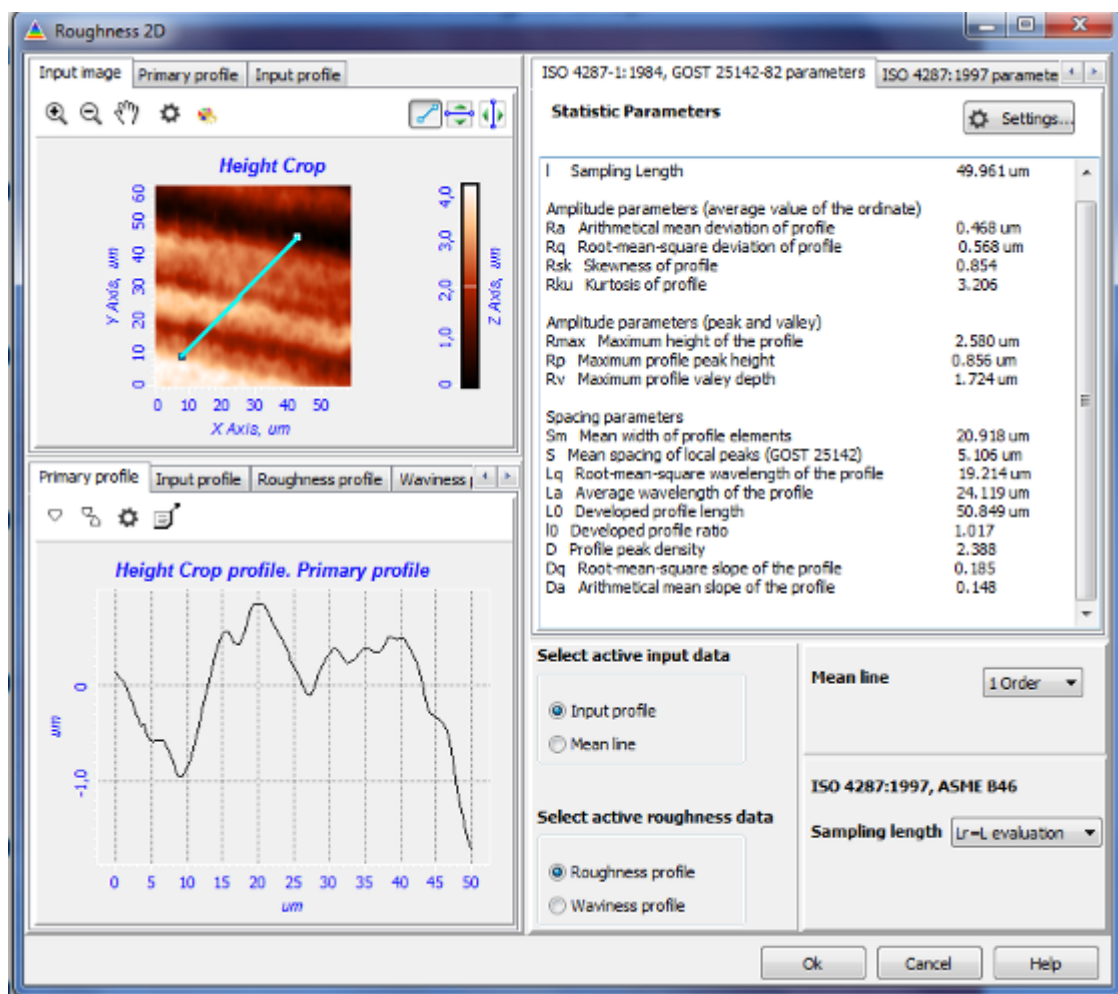
*Слика 5.50 Прскотине у превлаци хрома*

Фине прскотине у превлаци хрома (на слици 5.50 једна обележена), које настају услед распада хидрида и издвајања водоника невидљиве су голим оком. Нагризањем превлаке у раствору 10% сумпорне киселине присутне прскотине

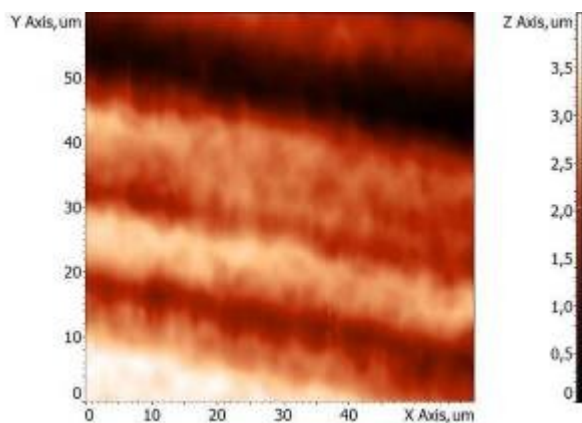
постају уочљиве као што се види са слике 5.50. Ове прскотине и канали се пружају у правцу струјних линија, што је сагласно подацима из литературе [30, 107].

### 5.2.2.2 Анализа морфологије микроскопијом атомских сила

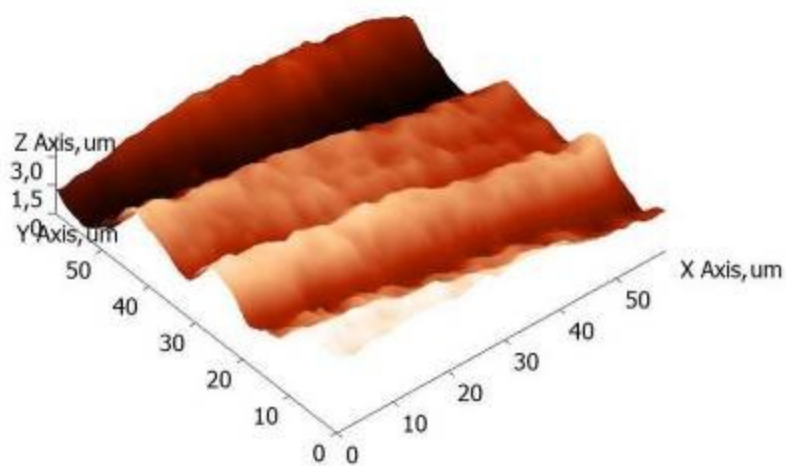
Са слика 5.51-5.52, односно 2D и 3D AFM приказа површина превлака, као и код исталожених превлака цинка јасно се уочава утицај завршне обраде подлоге за таложење превлака. Тако топографија превлаке верно прати трагове завршне обраде подлоге. Ако се посматра дебљина превлака резултати показују на тренд раста храпавости површине са продужетком времена таложења при таложењу метала из раствора, односно са порастом времена таложења и повећањем дебљине превлаке, долази до пораста храпавости, што је у складу са литературним наводима [30, 73].



Слика 5.51 Параметри храпавости превлаке хрома



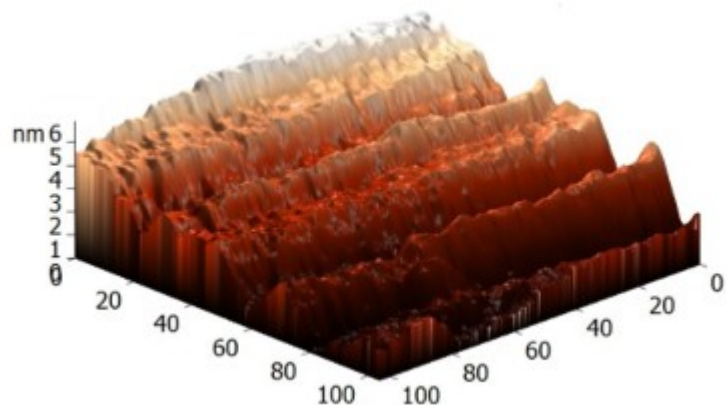
а)



б)

**Слика 5.52** 2D и 3D AFM снимци превлаке хрома

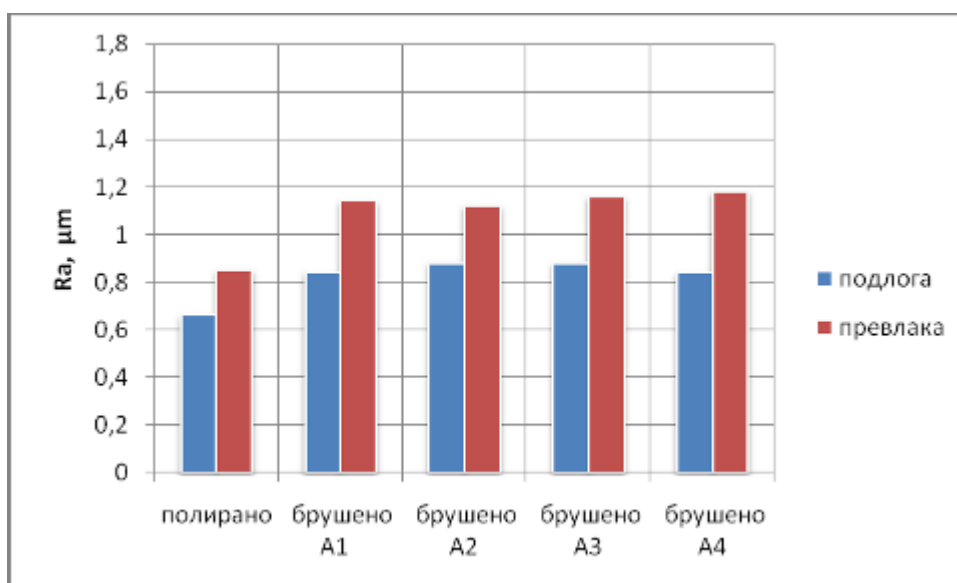
Према резултатима AFM линијске анализе уочљиве су доста високе вредности амплитудне хрпавости код свих узорака на које је таложена превлака хрома. Ивични ефекат је јасно изражен (слика 5.53).



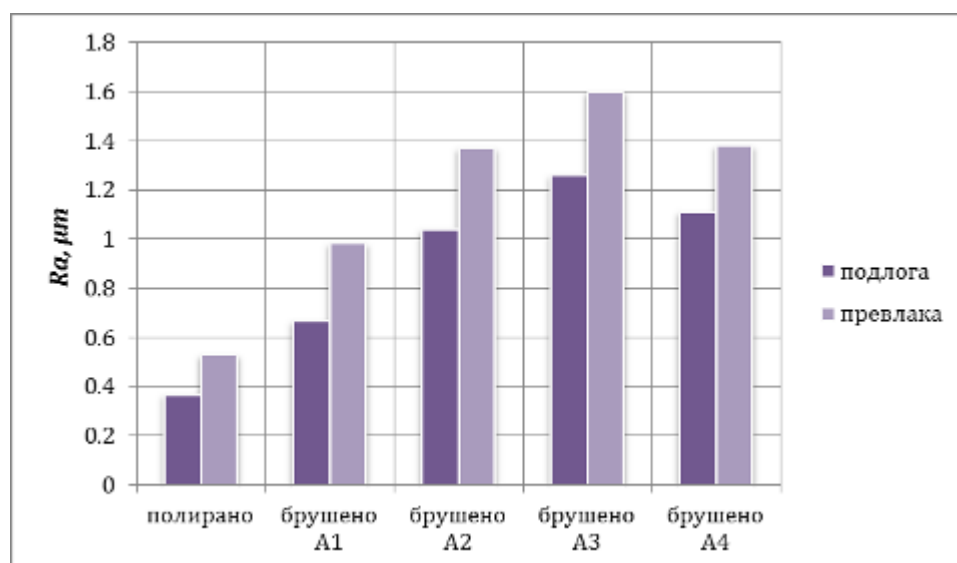
**Слика 5.53** Приказ ивичног ефекта на превлакама хрома

### 5.2.2.3 Храпавост превлака хрома

На слици 5.54 приказана је промена топографије за превлаке хрома у зависности од завршне обраде основног материјала – подлоге, густине струје и времена таложења. Промена храпавости у функцији времена таложења (слика 5.54, а, б) показује да је код превлака таложених струјом густине  $30 \text{ A/dm}^2$ , 360 минута, дошло до знатног повећања у односу на превлаке таложене 180 минута. Највећа промена храпавости је код превлака чија је подлога добијена полирањем док је код превлака таложеним на брушеној подлози повећање храпавости релативно уједначено и износи око 35%.



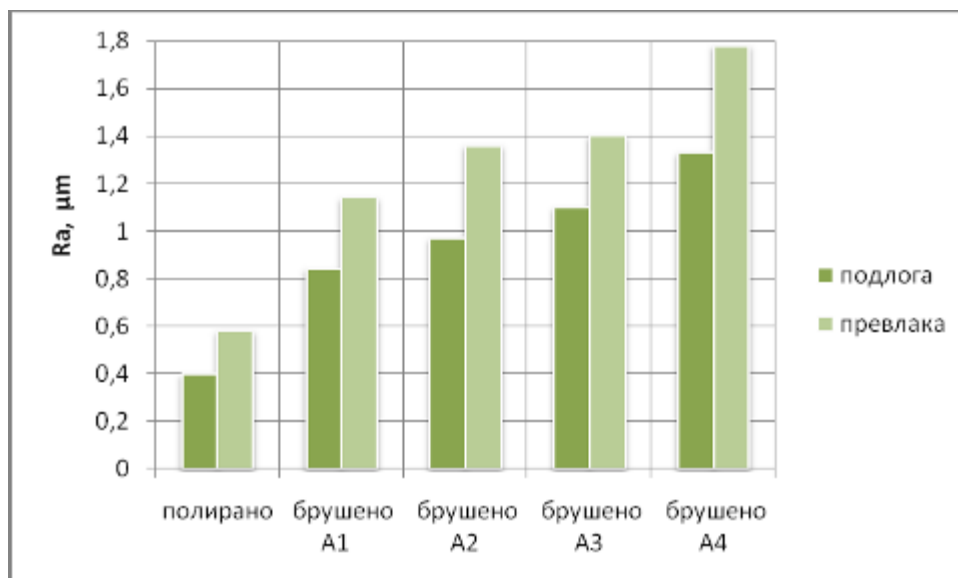
а) густина струје  $30 \text{ A/dm}^2$ , време таложења  $T=180 \text{ мин}$ ,



б) густина струје  $30 \text{ A/dm}^2$ , време таложења  $T=360 \text{ мин}$ ,

Слика 5.54 Топографија превлака хрома





в) густина струје  $60 \text{ A/dm}^2$ , време таложења  $T=360$  мин,

Слика 5.54 Топографија превлака хрома, наставак

Када је у питању густина струје таложења, повећање храпавости код превлака које су таложене 360 минута са струјом густине  $60 \text{ A/dm}^2$  је око 10% у односу на превлаке таложене исти временски период са струјом густине  $30 \text{ A/dm}^2$ .

### 5.2.3 Микротврдоћа превлака хрома

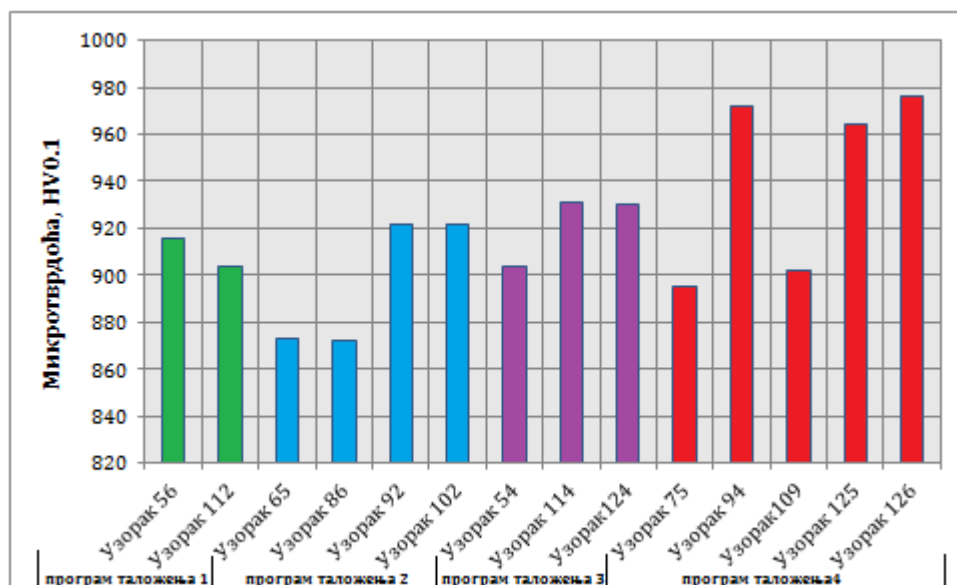
Резултати мерења микротврдоће превлака хрома приказани су у табели 5.10. Мерење је обављено на металографски припремљеним узорцима по методи Викерс- $\text{HV}_{0,1}$ . Свако мерење је обављено три пута па је узета средња вредност. Графички приказ микротврдоће за испитиване узорке приказан је на слици 5.56.

Тврдоћа је једна од основних карактеристика превлака хрома већих дебљина. Висока тврдоћа електролитичког хрома објашњава се углавном специфичношћу његове кристализације на катоди и образовању ситнозрне структуре. На тврдоћу превлаке хрома битно утичу режим електролизе (густина струје и температура електролита) и технологија припреме површине. Превлаке хрома таложене у хроматно-сулфатном електролиту на температурама од  $50$  до  $56^\circ \text{C}$ , у ширем опсегу густина струје ( $40$  до  $80 \text{ A/dm}^2$ ), имају максималне вредности тврдоће [58, 62]. Према Морисету [62] превлаке таложене на температурама од  $50$  до  $56^\circ \text{C}$  и дебљине од  $30$  до  $70 \mu\text{m}$ , имају уједначену микротврдоћу по целој површини.

Табела 5.10 Микротврдоћа превлака хрома

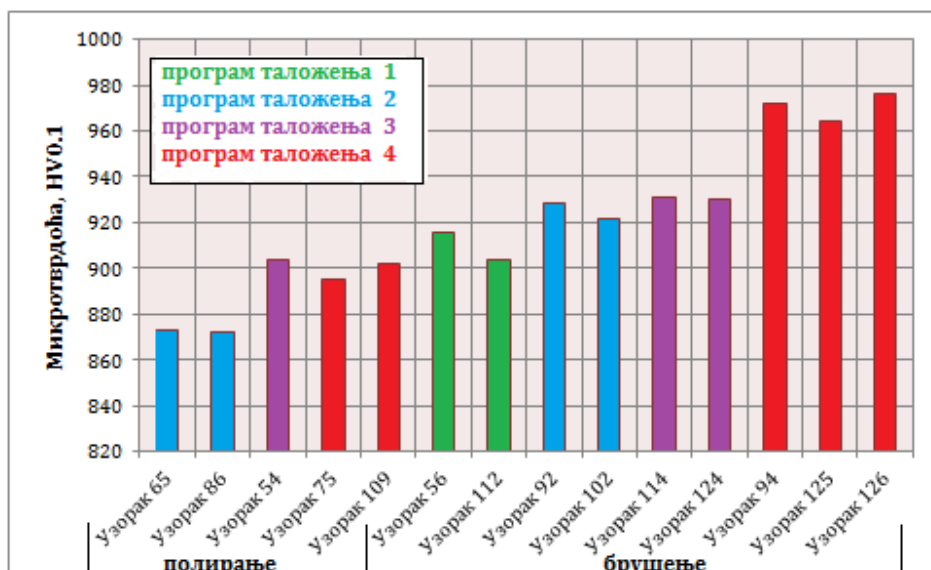
Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке			Микротврдоћа HV <sub>0.1</sub>		
	врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	програм таложења	дебљина $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$			
112	Брушење режим A <sub>4</sub>	36	0.870	1	22.48	1.142	1	900	904.00
							2	900	
							3	912	
114	Брушење режим A <sub>4</sub>	41	0.770	3	39.80	0.960	1	938	931.33
							2	926	
							3	930	
125	Брушење режим A <sub>4</sub>	34	1.060	4	58.26	1.410	1	966	964.00
							2	966	
							3	960	
126	Брушење режим A <sub>4</sub>	39	1.330	4	88.90	1.880	1	966	976.00
							2	982	
							3	980	
92	Брушење режим A <sub>3</sub>	35	1.230	2	34.00	1.600	1	936	928.66
							2	920	
							3	930	
102	Брушење режим A <sub>3</sub>	41	1.260	2	40.00	1.510	1	920	922.00
							2	920	
							3	926	
124	Брушење режим A <sub>3</sub>	40	0.940	3	39.70	1.390	1	930	930.66
							2	930	
							3	932	
94	Брушење режим A <sub>2</sub>	39	0.990	4	88.90	1.368	1	976	972.00
							2	980	
							3	960	
56	Брушење, режим A <sub>1</sub>	32	0.850	1	24.76	1.130	1	920	916.0
							2	912	
							3	916	
54	Полирање	47	0.690	3	39.10	0.870	1	906	904.00
							2	906	
							3	900	
65	Полирање	30	0.457	2	33.86	0.600	1	860	873.33
							2	880	
							3	880	
75	Полирање	21	0.404	4	82.50	0.580	1	890	895.33
							2	890	
							3	906	
86	Полирање	41	0.480	2	38.96	0.800	1	870	872.66
							2	880	
							3	868	
109	Полирање	34	0.349	4	41.90	0.570	1	890	902.00
							2	906	
							3	910	

Превлаке таложене током експеримента имају дебљину у распону од 20  $\mu\text{m}$  до приближно 90  $\mu\text{m}$ , а температура таложења била је 55° C. Како се види из табеле 5.10, вредности микротврдоће превлаке хрома крећу се у границама од 872.66  $\text{HV}_{0.1}$  до 976  $\text{HV}_{0.1}$ , што је у сагласности са литературним подацима датим за превлаке исталожене на површинама чија је завршна обрада брушење [113].



Слика 5.55 Графички приказ микротврдоће превлака

Утицај густине струје таложења на тврдоћу превлака хрома таложених на температури од 55 °C види се и са дијаграма на слици 5.55. Превлаке таложене са густином струје 60  $\text{A}/\text{dm}^2$  (програм 3 и 4) имају вишу тврдоћу од превлака таложених са густином струје од 30  $\text{A}/\text{dm}^2$  (програм 1, 2). На дијаграму 5.55, уочљиво је да је тврдоћа превлака хрома на узорцима број 65 и 86, таложених са струјом од 30  $\text{A}/\text{dm}^2$  и превлака хрома на узорцима број 54, 75 и 109, таложених са струјом од 60  $\text{A}/\text{dm}^2$  знатно мања од осталих превлака таложених са истим струјама. Ове превлаке су исталожене на полираним подлогама и њихова тврдоћа је мања, што је у сагласности са резултатима добијеним у [72]. На дијаграму на слици 5.56, приказан је утицај врсте обраде подлоге на величину микротврдоће исталожених превлака. Анализа стања површина на којима су таложене превлаке хрома, показује да превлаке таложене на брушеној површини имају вишу тврдоћу у односу на превлаке таложене на полираној површини [72, 113]. Ако се посматра тврдоћа подлоге види се њен утицај на тврдоћу превлаке. За формирање зависности утицаја тврдоће подлоге на тврдоћу превлаке потребна су опсежнија испитивања и боља мерна опрема.



**Слика 5.56** Приказ микротврдоће превлака хрома у зависности од врсте обраде подлоге

Када је у питању дебљина превлаке, истраживања показују опречне ставове. Нека истраживања превлака дебљина приближно 250  $\mu\text{m}$  [20, 113], показала су да вредност микротврдоће опада са порастом дебљине, а нека да дебљина нема утицај на микротврдоћу када се превлака таложи из више слојева [72]. Сprovedена истраживања су се базирала на доста тањим превлакама (20  $\mu\text{m}$  до 90  $\mu\text{m}$ ) и добијени резултати су у сагласности са теоријом да дебљина превлаке хрома не утиче на њену тврдоћу.

## 5.2.4 Испитивање адхезије

Јачина приањања превлаке хрома за основни метал-подлогу на који се таложи зависи од припреме основног метала, врсте метала и примењеног режима таложења. Добра припрема површине, а потом и анодно активирање у хроматном електролиту обезбеђују добро приањање превлаке за подлогу. Према неким истраживањима дебљина исталожене превлаке не утиче на јачину приањања [72, 95].

### 5.2.4.1 Метода загревања

Испитивање адхезије је извршено методом загревања (термичког шока) према стандарду SORS 2328 [120].

Услови испитивања:



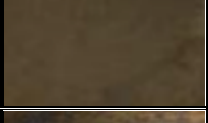


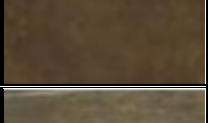

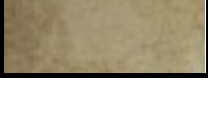
- Температура загревања узорак  $T=370\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

- Време загревања 2 сата,
- Квашење млазом хладне воде.

После загревања према условима датим стандардом узорци се излажу млазу хладне воде. Превлака мора да остане непромењена, не сме да дође до појаве одслојавања превлаке са основног материјала, подлоге.

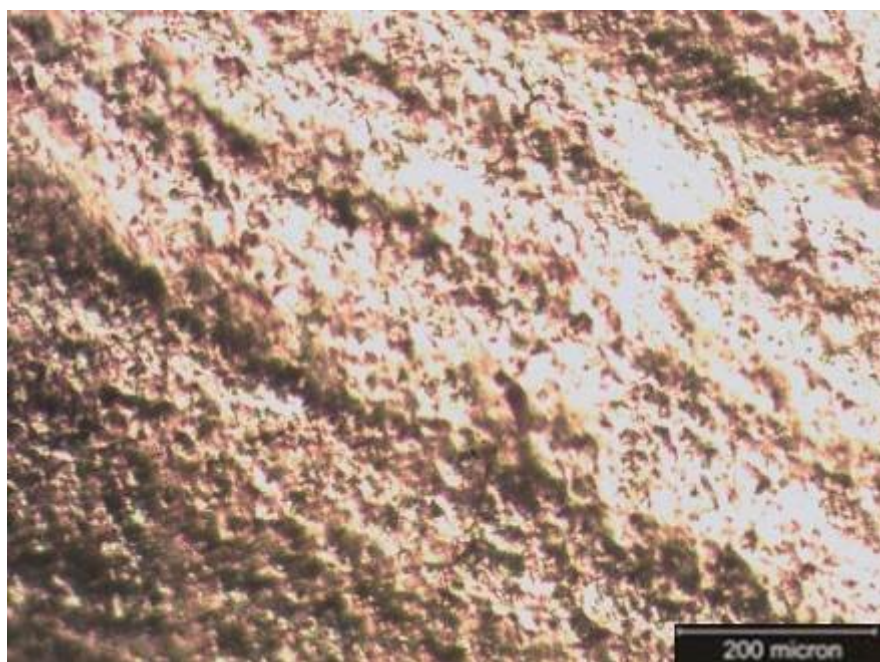
У табели 5.11, приказане су карактеристике превлака хрома на којима је приањање испитивано методом загревања.

**Табела 5.11** Преглед испитиваних узорака методом загревања

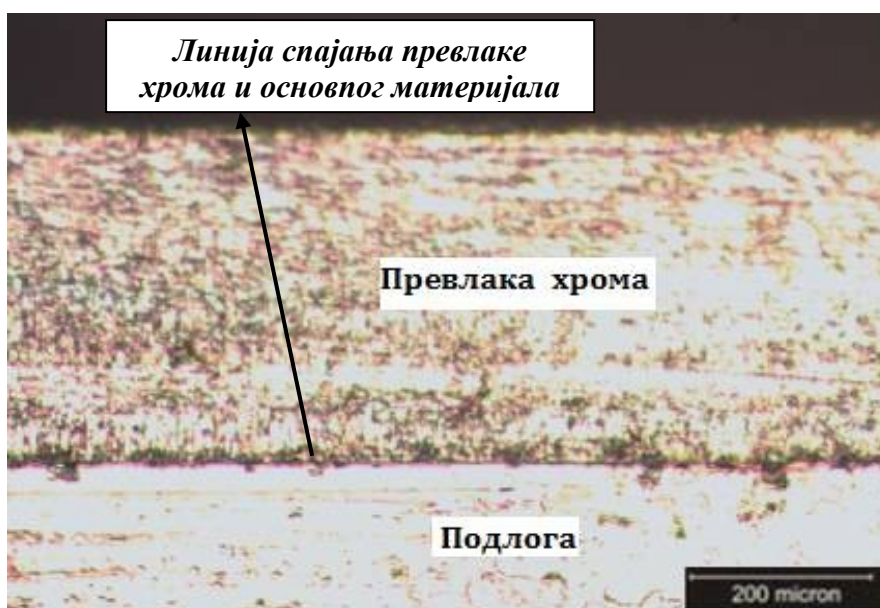
Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке			Изглед превлаке
	Завршна обрада	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Програм таложења	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	
81	Брушење, режим A <sub>2</sub>	37	0.966	1	27.00	1.288	
85	Брушење, режим A <sub>2</sub>	34	0.926	1	26.16	1.288	
94	Брушење, режим A <sub>2</sub>	39	0.990	4	88.90	1.368	
56	Брушење, режим A <sub>1</sub>	32	0.850	1	24.76	1.130	
65	Полирање	30	0.457	2	33.86	0.600	
93	Полирање	28	0.690	4	76.20	0.868	
101	Полирање	40	0.454	4	65.10	0.610	
105	Полирање	33	0.447	2	30.57	0.770	

После проведенe процедуре дате стандардом, сви узорци су визуелно прегледани, што је захтев стандарда SORS 2328, а потом и на оптичком микроскопу. На испитиваним узорцима није уочена појава одслојавања превлаке хрома од основног материјала. Површина је чиста, превлака стабилна, чврсто приљубљена уз подлогу на коју је нанета, слика 5.57. Испитивани узорци су задовољили захтеве стандарда.

Потврда доброг приањања за основни метал као и између слојева хрома види се и са слике 5.58. Као што је приказано на слици, током сечења узорака није дошло до нарушавања компактности превлаке дуж читаве дужине за основни метал и између слојева. Независно од коришћених технолошких параметара приањање превлаке за основни метал је добро, као и међусобно приањање између самих слојева.



*Слика 5.57 Изглед површине превлаке хрома после испитивања адхезије загревањем*



*Слика 5.58 Пресек превлаке хрома*

## 5.2.4.2 "Scratch" тест- превлака хрома

Тест браздањем је проведено сагласно стандарду ASTM D7187 [117], да би се добиле информације о чврстоћи везе подлоге и превлаке. Испитивање је извршено на уређају "Scratch tester ST-99", слика 4.23.

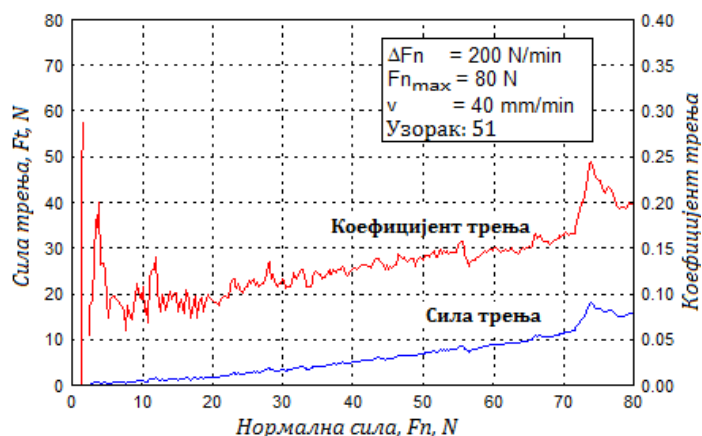
Испитивање је обављено са следећим параметрима:

- максимална нормална сила: 80 N,
- пораст силе: 200 N/min,
- брзина кретања узорка: 40 mm/min,
- пут узорка: 9 mm.

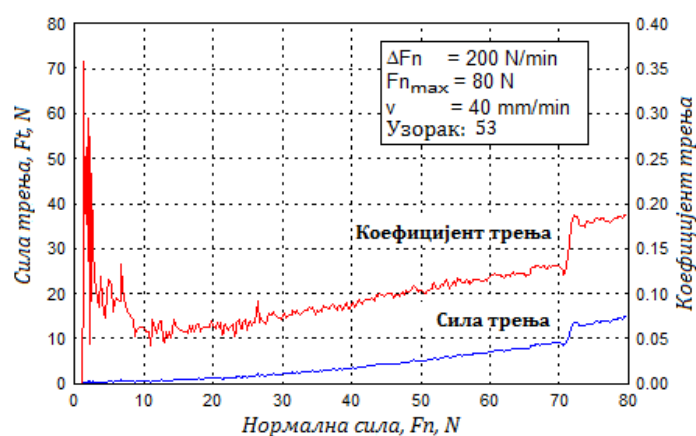
Табела 5.12 Критичне силе код "scratch" теста превлака хрома

Узорак број	Карактеристике подлоге			Програм таложења	Карактеристике превлаке		Критична сила, $L_c$	
	врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$		Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$		
88	Брушење, режим $A_4$	32	1.150	2	40.48	1.340	$L_{c1}$	16
							$L_{c2}$	32
							$L_{c3}$	46
121	Брушење, режим $A_4$	41	0.800	3	43.70	1.310	$L_{c1}$	18
							$L_{c2}$	35
							$L_{c3}$	50
113	Брушење, режим $A_3$	31	1.090	3	36.16	1.417	$L_{c1}$	16
							$L_{c2}$	32
							$L_{c3}$	48
119	Брушење, режим $A_3$	40	0.990	3	40.90	1.371	$L_{c1}$	16
							$L_{c2}$	36
							$L_{c3}$	48
74	Брушење, режим $A_2$	40	0.880	1	22.00	1.271	$L_{c1}$	15
							$L_{c2}$	36
							$L_{c3}$	50
57	Брушење, режим $A_1$	40	0.870	3	41.20	1.340	$L_{c1}$	15
							$L_{c2}$	37
							$L_{c3}$	49
51	Полирање	40	0.660	3	40.57	0.860	$L_{c1}$	22
							$L_{c2}$	44
							$L_{c3}$	66
53	Полирање	32	0.480	2	32.50	0.640	$L_{c1}$	18
							$L_{c2}$	46
							$L_{c3}$	60
70	Полирање	34	0.500	2	38.00	0.640	$L_{c1}$	20
							$L_{c2}$	46
							$L_{c3}$	62
122	Полирање	39	0.424	4	58.42	0.546	$L_{c1}$	22
							$L_{c2}$	48
							$L_{c3}$	66

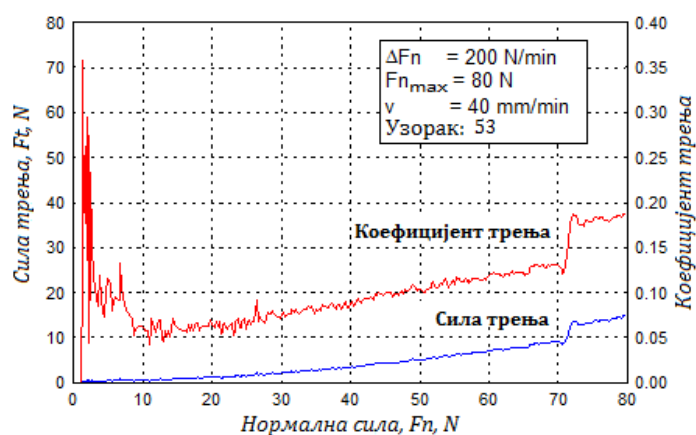
На слици 5.59, дати су дијаграми "scratch" теста за испитиване узорке. На сваком испитиваном узорку одређене су критичне силе  $L_{c1}$ ,  $L_{c2}$  и  $L_{c3}$ . Вредности ових сила израчунате су после испитивања, мерењем удаљености карактеристичних оштећења од почетка отиска и приказане су у табели 5.12, а графички приказ на слици 5.60.



а)



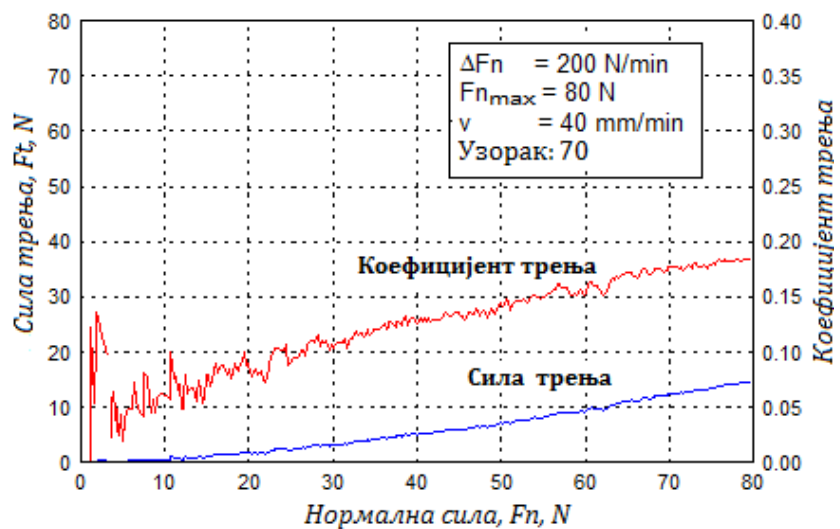
б)



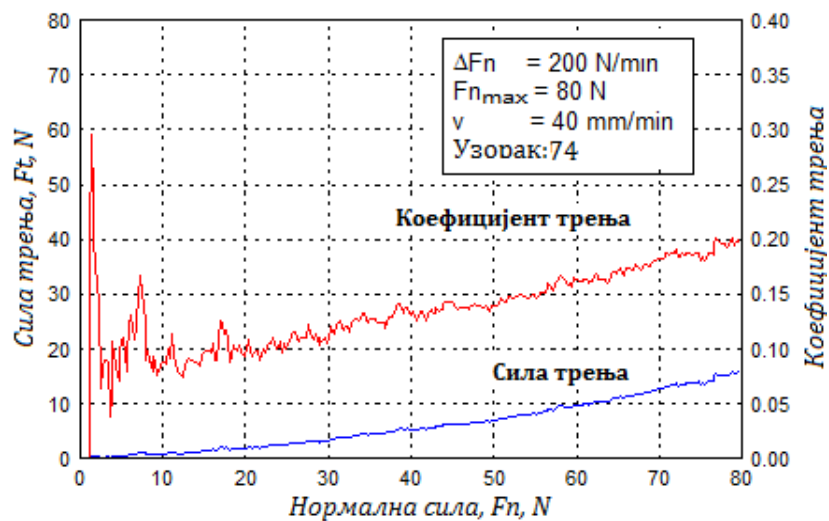
в)

Слика 5.59 Дијаграми "scratch" теста испитиваних превлака хрома

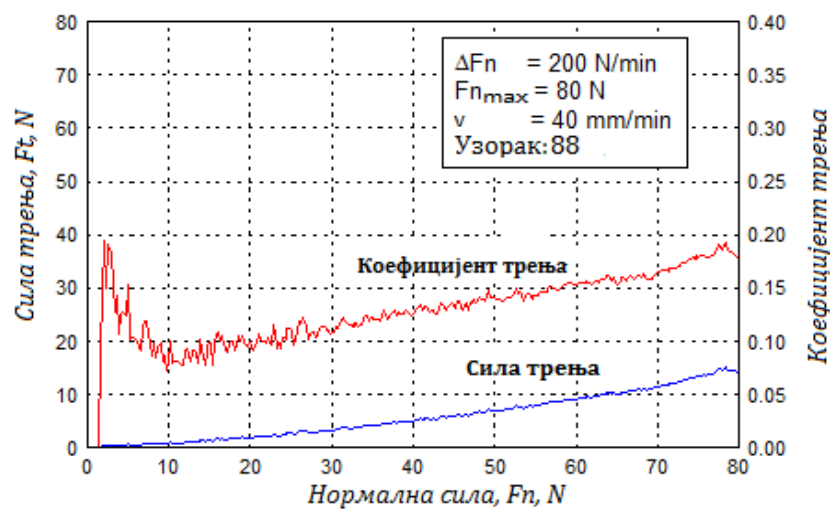




г)

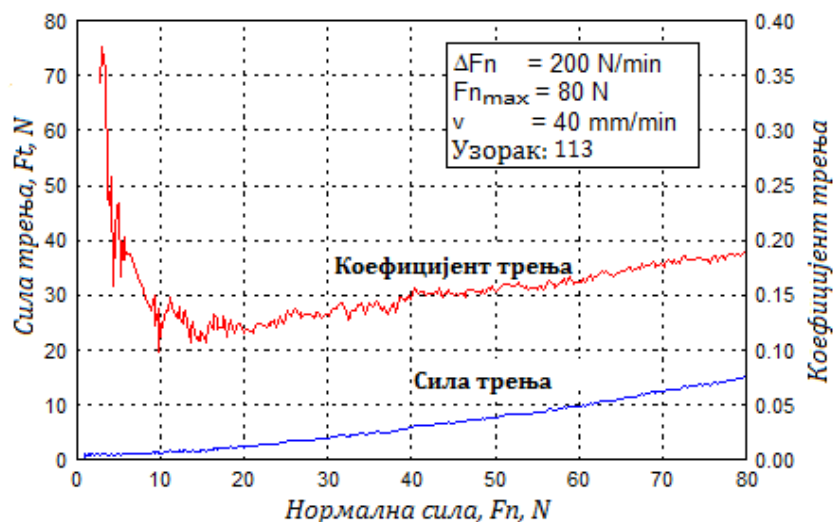


д)

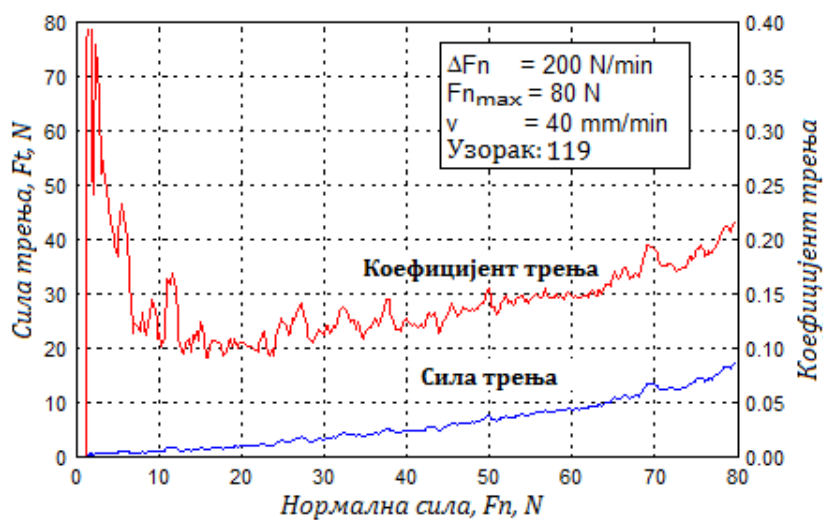


б)

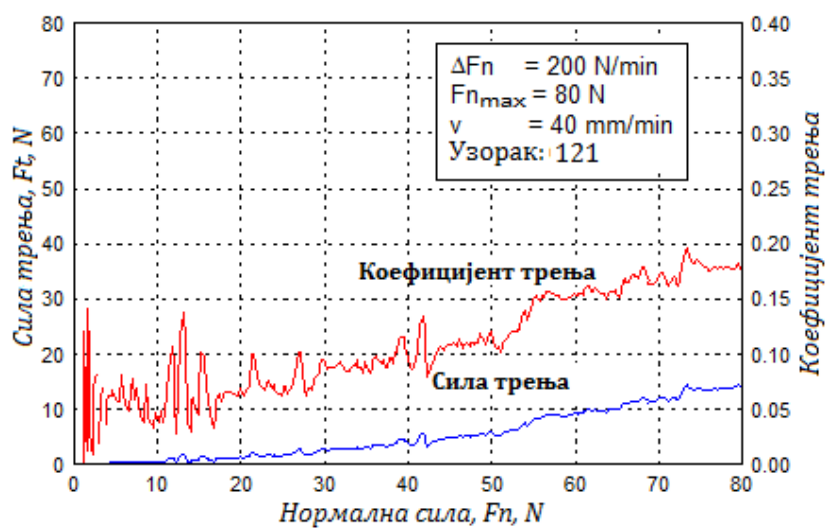
Слика 5.59 Дијаграми "scratch" теста испитиваних превлака хрома, наставак



е)

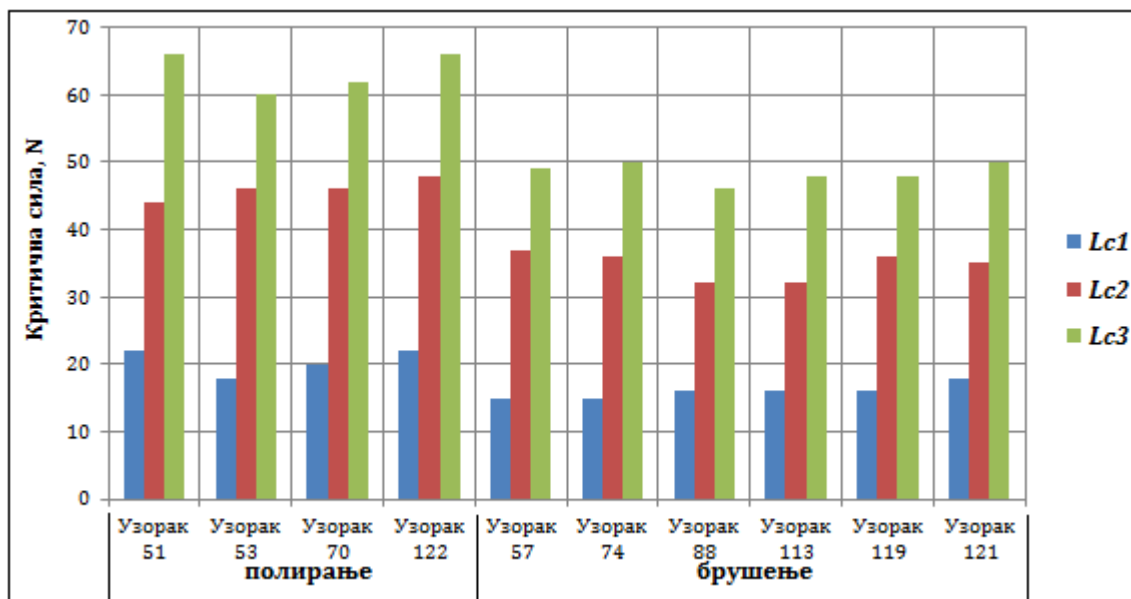


ж)



з)

Слика 5.59 Дијаграми "scratch" теста испитиваних превлака хрома, наставак

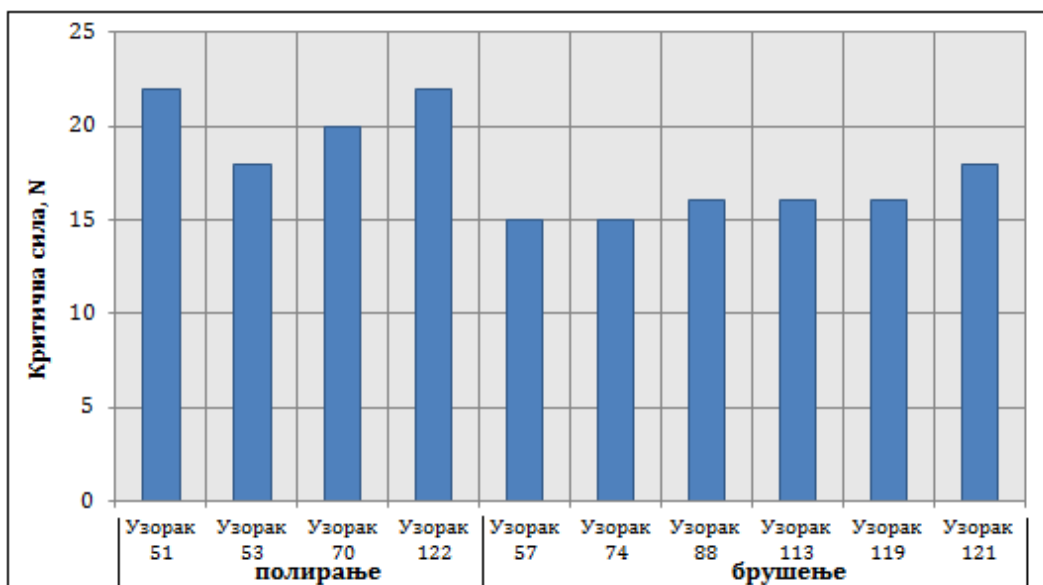


Слика 5.60 Збирни дијаграм критичних сила при "scratch" тесту превлака хрома

Појединачне вредности критичних сила приказане су у табелама 5.13 - 5.15, а графички прикази на сликама 5.61 - 5.63.

Табела 5. 13 Критична сила  $L_{c1}$

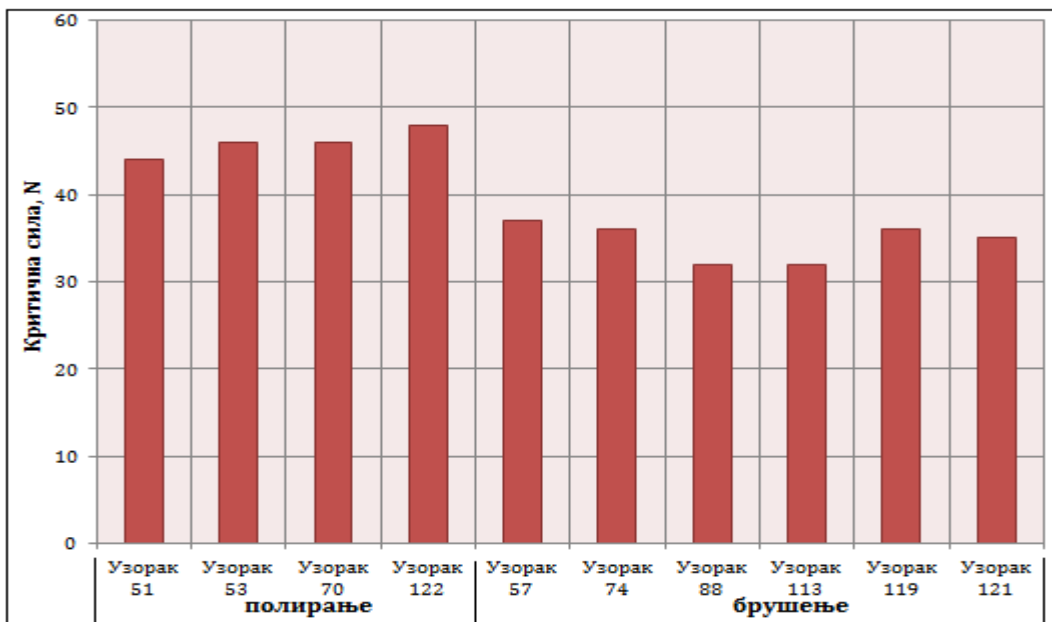
	Узорак 51	Узорак 53	Узорак 57	Узорак 70	Узорак 74
$L_{c1}$	22	18	15	20	16
	Узорак 88	Узорак 113	Узорак 119	Узорак 121	Узорак 122
$L_{c1}$	16	16	16	16	22



Слика 5.61 Критична сила  $L_{c1}$

**Табела 5. 14** Критична сила  $Lc_2$

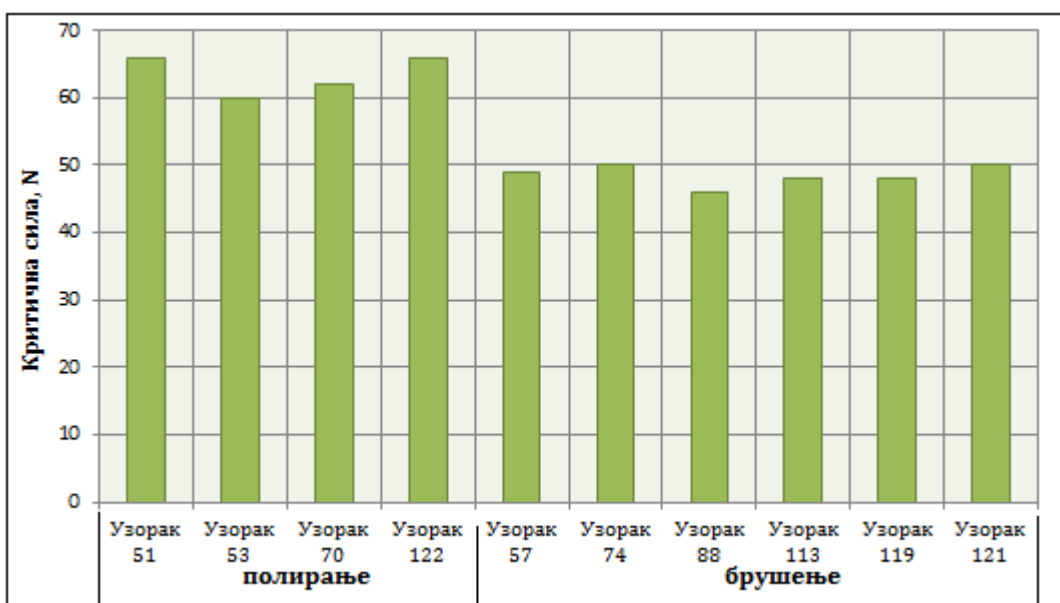
	Узорак 51	Узорак 53	Узорак 57	Узорак 70	Узорак 74
$Lc_2$	44	46	37	46	36
	Узорак 88	Узорак 113	Узорак 119	Узорак 121	Узорак 122
$Lc_2$	32	38	36	35	48



**Слика 5.62** Критична сила  $Lc_2$

**Табела 5. 15** Критична сила  $Lc_3$

	Узорак 51	Узорак 53	Узорак 57	Узорак 70	Узорак 74
$Lc_3$	66	66	49	65	50
	Узорак 88	Узорак 113	Узорак 119	Узорак 121	Узорак 122
$Lc_3$	46	54	48	50	66



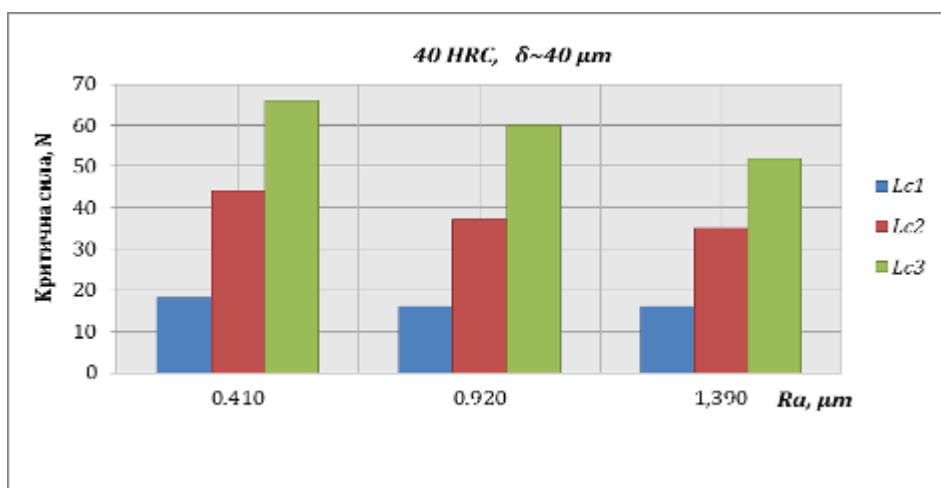
**Слика 5.63** Критична сила  $Lc_3$

Микроскопском анализом трага браздања на испитиваним узорцима и њиховим међусобним поређењем, уочавају се исте промене на превлакама, односно при разарању превлаке се понашају исто без обзира на карактеристике подлоге и параметре таложења. Разликују се само вредности критичних сила при којима долази до потпуног разарања превлаке.

На сликама 5.64 и 5.65, приказани су дијаграми вредности критичних сила при „scratch“ тесту за неколико узорака различитих карактеристика [44]. Анализирани су узорци који имају:

- исту тврдоћу подлоге и дебљину превлаке и различиту храпавост подлоге, и
- исту храпавост подлоге и дебљину превлаке и различиту тврдоћу подлоге.

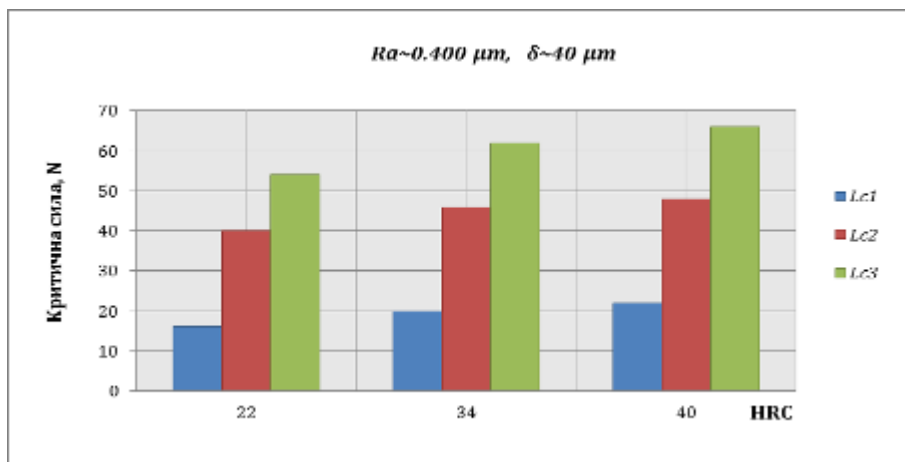
Ако се посматра зависност критичних сила  $L_c$ , од параметара подлоге запажа се следеће. Код узорака са различитом храпавошћу подлоге ( $R_a=0.410-1.390 \mu m$ ) вредности критичних сила  $L_c$  опадају са порастом храпавости, слика 5.64.



**Слика 5.64** Утицај храпавости подлоге на вредност критичних сила при "scratch" тесту

Када се анализира утицај тврдоће подлоге за таложење превлаке хрома на вредност критичне сила за разарање, запажа се да она расте са порастом тврдоће подлоге, слика 5.65. Вредности критичних сила су уједначене за превлаке исталожене на подлогама добијеним истим технологијама. Пошто су се тврдоће испитиваних узорака кретале у интервалу од 22-42 HRC, за утврђивање зависности величине критичних сила  $L_c$  од тврдоће подлоге на коју су исталожене превлаке потребна су опсежнија испитивања. Када је у питању струја таложења критичне силе разарања превлака имају вишу вредност код превлака таложених

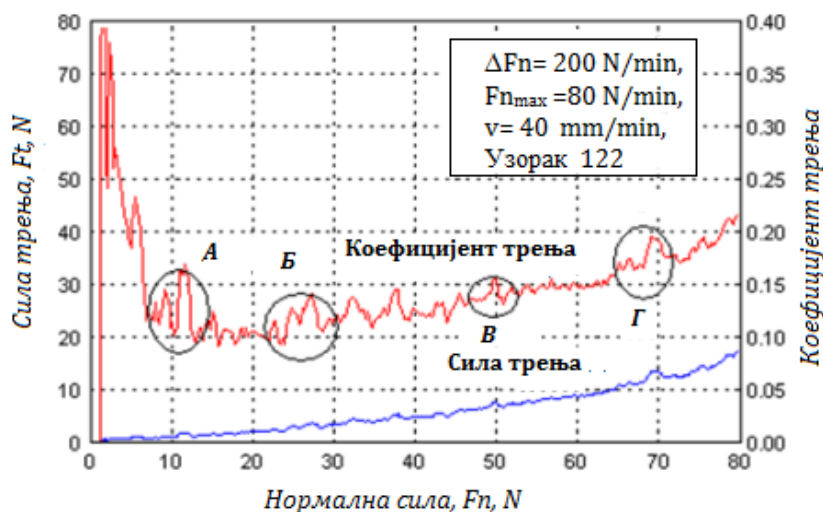
са густином струје од  $60 \text{ A/dm}^2$ . Није уочен утицај дебљине превлаке на вредност критичне силе разарања превлаке при истим осталим утицајним факторима.



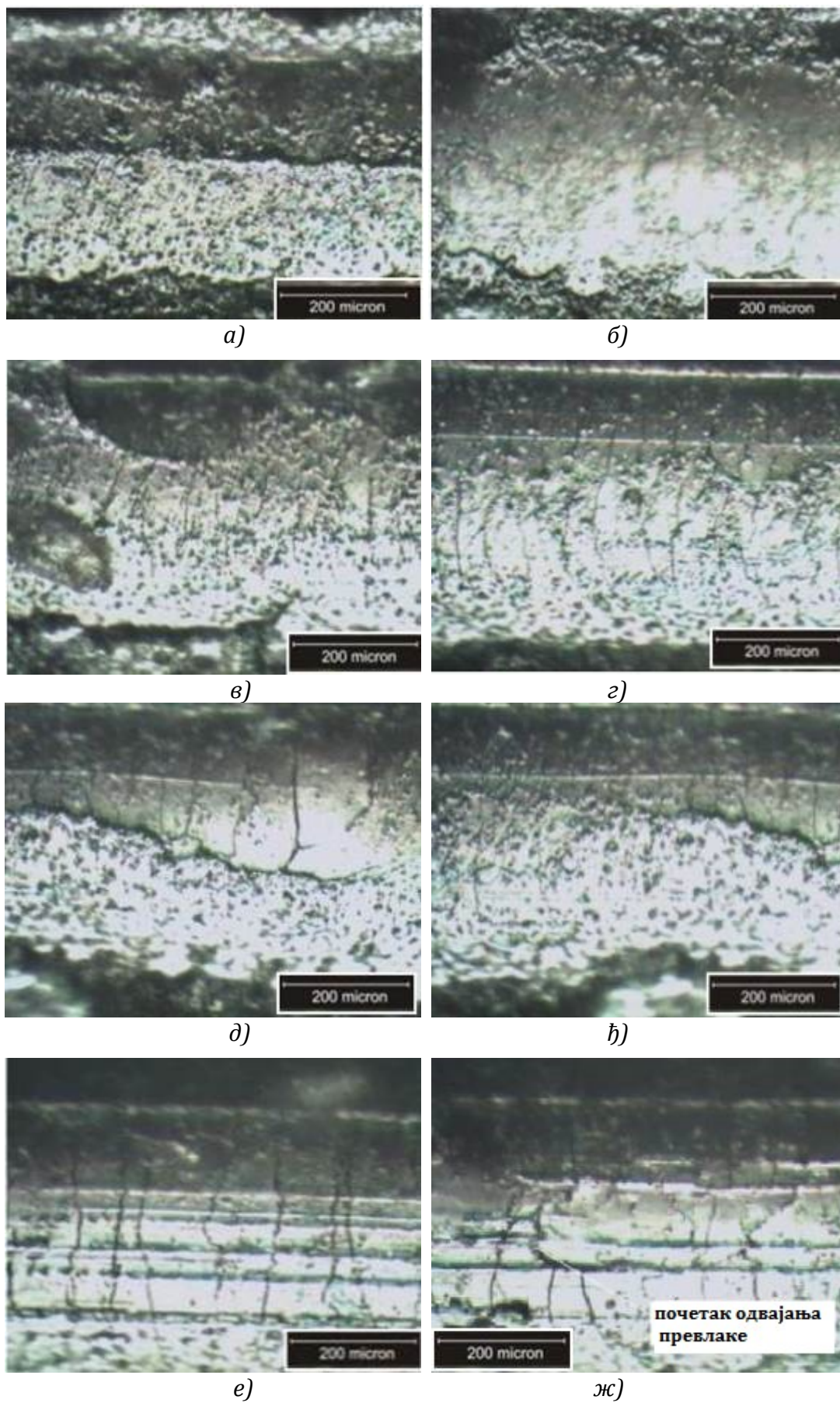
Слика 5.65 Утицај тврдоће подлоге на вредност критичних сила при "scratch" тесту

Ако се посматра зависност критичних сила  $L_c$  од параметара подлоге запажа се следеће. Код узорака приближних карактеристика подлоге и дебљине превлака, вредности критичних сила се разликују незнатно, 5-10%. Ова разлика је последица параметара таложења превлака хрома.

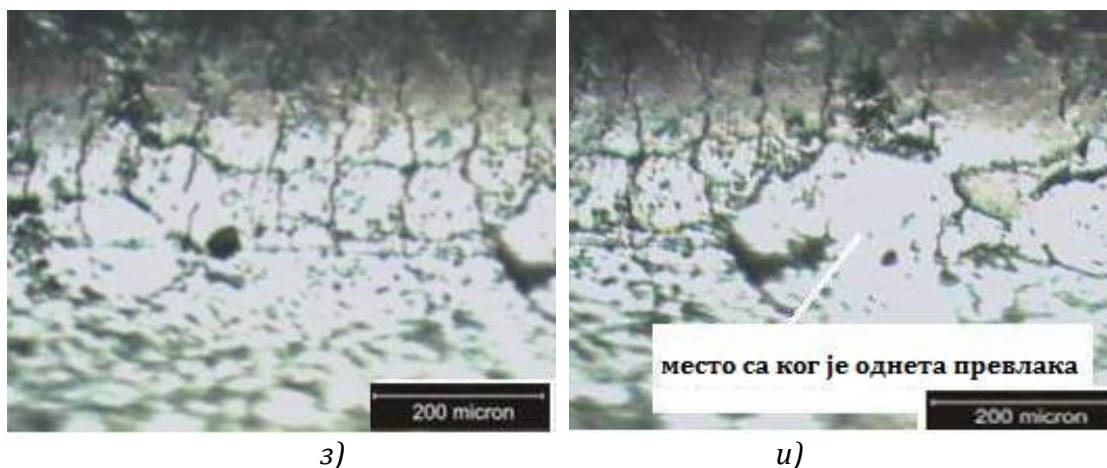
На слици 5.66, приказан је "scratch" дијаграм за узорак број 122. На дијаграму се уочавају карактеристична подручја са минималним и максималним променама вредности коефицијента трења као и подручјима у којима долази до значајније промене вредности коефицијента трења. Ова подручја су тачно лоцирана и за њих су снимљене фотографије изгледа површине скреч трага, слика 5.67.



Слика 5.66 Дијаграм "scratch" теста за узорак број 122



Слика 5.67 Траг "scratch" теста на узорку број 122



Слика 5.67 Траг "scratch" теста на узорку број 122, наставак

На слици 5.67, а-б, (положај А на слици 5.66) види се да долази до одношења Cr са врхова неравнина. Слика 5.67, в, г, одговара положају Б на дијаграму на слици 5.66, где се уочава значајнији пораст коефицијента трења и појава првих прскотина по превлаци које одговарају сили  $Lc_1$ .

Са слика 5.67, д-е, (положај В на слици 5.66) се види да долази до значајнијег одношења превлаке хрома и загревавања врха неравнине веће запремине. Коефицијент трења расте и долази до настанка бочних прскотина на превлаци које одговарају сили  $Lc_2$ .

Слике ж-и, одговарају положају Г на дијаграму (слика 5.66) где се јасно виде прскотине превлаке по целој површини трага игле, које одговарају сили  $Lc_3$ . Почетак оштећења и пуцања превлаке види се са слике 5.67, ж, а потпуно одношење превлаке са подлоге приказано је на сликама 5.67, з и и.

Анализом резултата скреч теста потврђена је хипотеза о утицају претходне обраде (храпавости) на карактеристике превлака [20].

## 5.2.5 Триболошка испитивања превлака хрома

Испитивање хабања превлака хрома су вршена на трибометру TR-95 са контактом "block-on-disk". Развој процеса хабања на блоку манифестује се формирањем и ширењем израженог трага хабања.

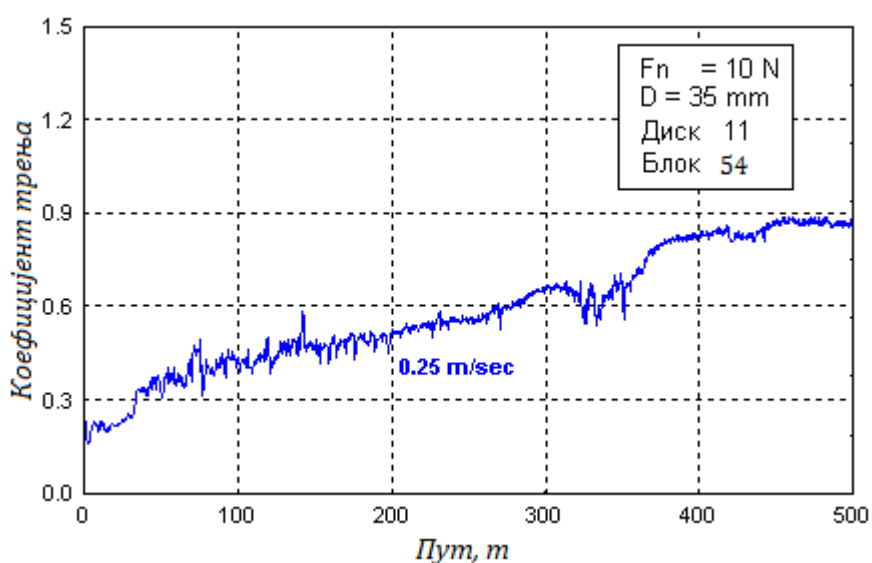
Параметри испитивања:

- Нормално оптерећење 10 N,
- брзине клизања 0,25 m/s,
- Укупан пут клизања 500 m.

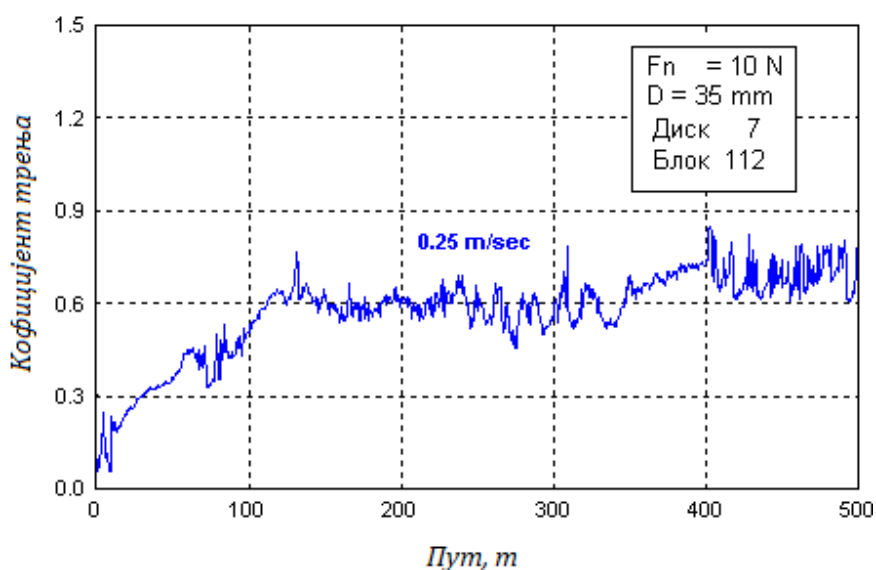


Реализована испитивања су била са граничним подмазивањем са минералним уљем *Хидровиск ХД 46* због великог коефицијента трења у случају трења без подмазивања и великих вибрација у систему мерења силе трења код трибометра ТР-95. Примери сигнала коефицијента трења испитиваних узорака са превлакама хрома таложеним на подлогама добијеним различитом завршном обрадом приказани су на слици 5.68.

Паралелно са праћењем промене коефицијента трења праћен је и процес хабања блока у условима трења са подмазивањем. За праћење процеса хабања коришћена је промена ширине трага хабања на контактної површини испитиваног блока.

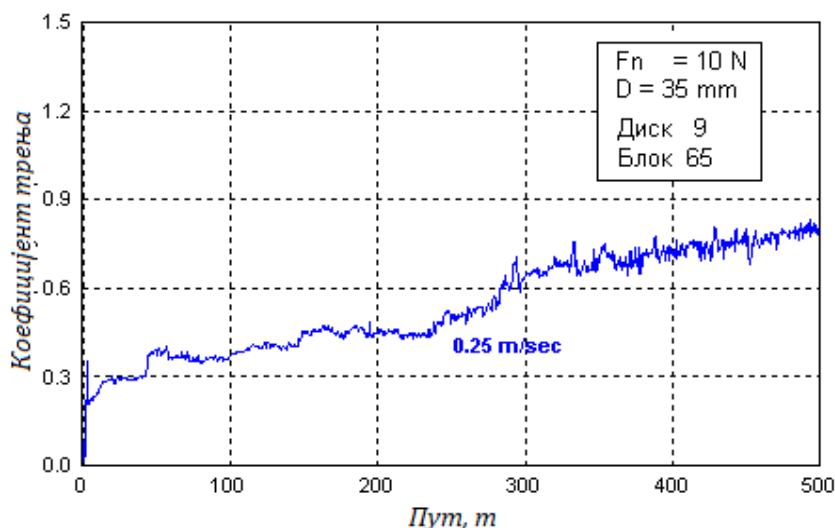


а) фино брушена површина



б) грубо брушена површина

Слика 5.68 Промена коефицијента трења превлака хрома



ц) механички полирана површина

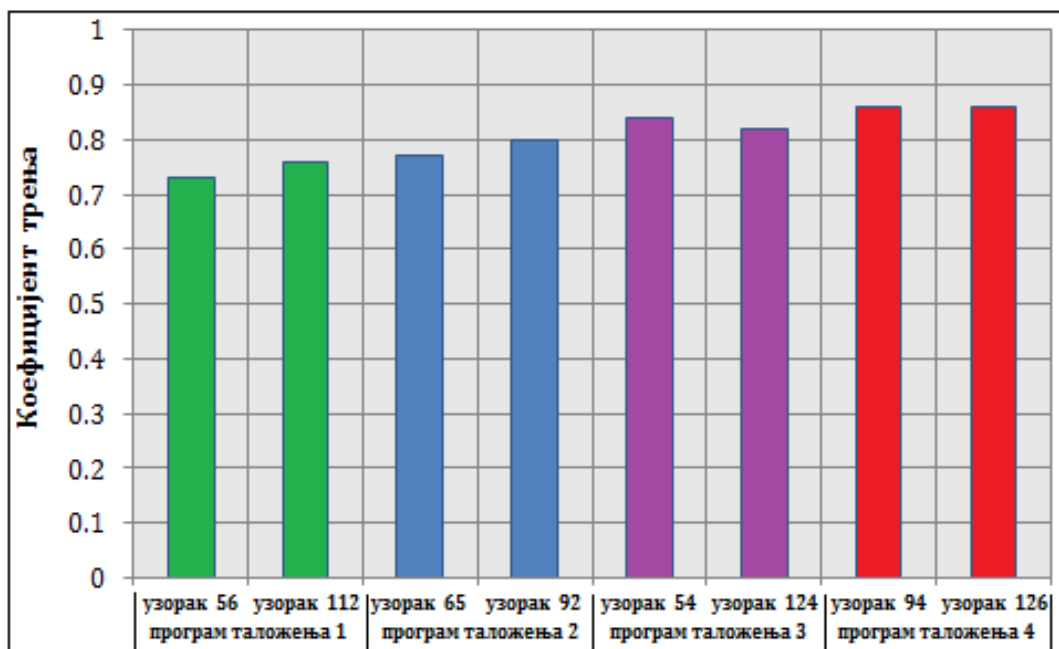
**Слика 5.68** Промена коефицијента трења превлака хрома, наставак

У табели 5.16 дати су резултати испитивања, коефицијента трења и ширине трага хабања узорака са превлаком хрома, а на сликама 6.69 и 6.70 њихов графички приказ. Коефицијент трења је средња вредност након уходавања после 400 до 500 метара пута.

**Табела 5.16** Коефицијент трења и ширина трага хабања

Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке			Коефицијент трења	Ширина трага хабања, mm
	Врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Дебљина, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Програм таложења		
112	Брушење, режим $A_4$	41	0.870	22.48	1.242	1	0.76	1.395
126	Брушење, режим $A_4$	39	1.330	88.90	1.880	4	0.86	1.260
92	Брушење, режим $A_3$	35	1.230	34.00	1.600	2	0.80	1.323
124	Брушење, режим $A_3$	40	0.940	39.70	1.390	3	0.82	1.260
94	Брушење, режим $A_2$	39	0.990	88.90	1.368	4	0.86	1.240
56	Брушење, режим $A_1$	32	0.850	24.76	0.870	1	0.78	1.360
54	Полирање	42	0.690	39.10	0.870	3	0.74	1.275
65	Полирање	30	0.457	33.86	0.600	2	0.73	1.350

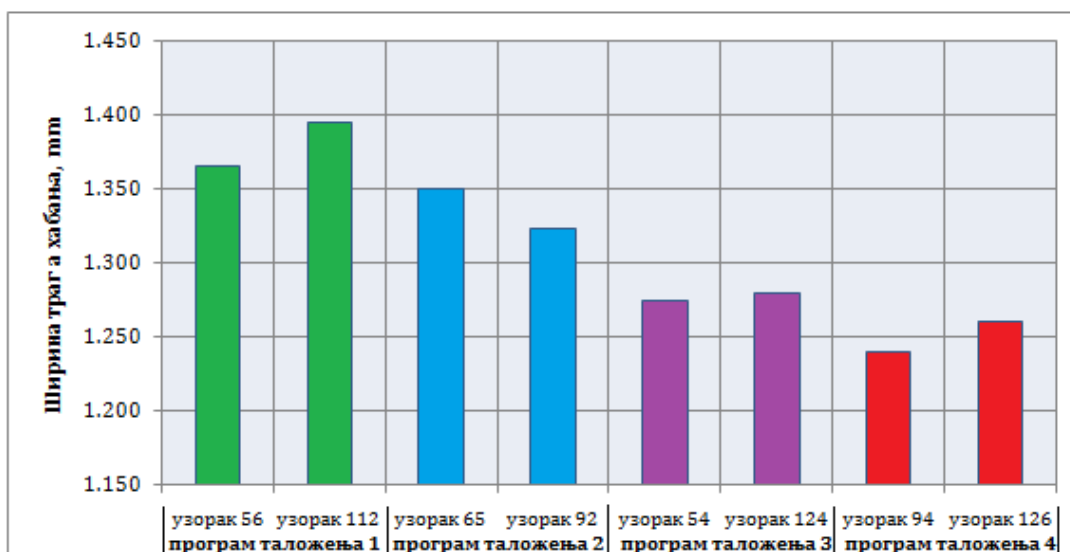
Вредност коефицијент трења креће се у границама од 0.73 до 0.86 и у сагласности је са резултатима добијеним у истраживањима [22, 58, 66]. Вредност коефицијента трења је виша код превлака таложених по програмима 3 и 4, односно са струјом густине од  $60 \text{ A/dm}^2$ . Ове превлаке имају вишу тврдоћу.



Слика 5.69 Промена вредности коефицијента трења

Промена вредности ширине трага хабања има исти карактер за све испитиване узорке само је разлика у нивоу њихове похабаности. Процес хабања карактерише постизање одређеног нивоа, стабилизацију и малу промену ширине трага хабања током времена испитивања. Ширина трага хабања је мања код превлака добијених по програму 3 и 4, односно са струјом густине од  $60 \text{ A/dm}^2$ .

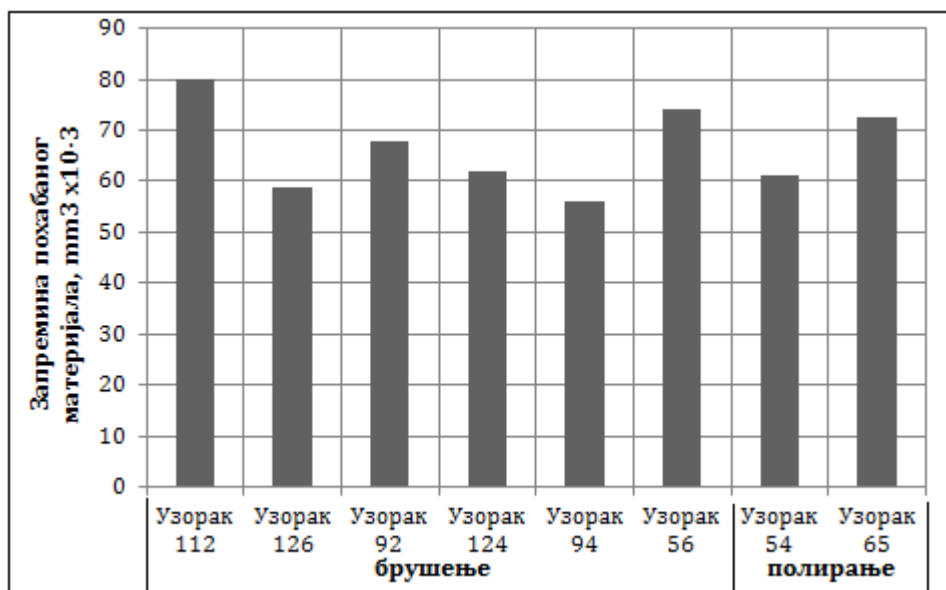
Отпорност на хабање превлака хрома је одређена на основу запремине похабаног материјала. Вредности запремине похабаног материјала за превлаке хрома приказане су у табели 5.17, а графички приказ на слици 5.71.



Слика 5.70 Промена ширине трага хабања

Табела 5.17 Запремина похабаног материјала

Узорак број	Карактеристике подлоге			Карактеристике превлаке				Запремина похабаног материјала $\text{mm}^3 \times 10^{-3}$
	Врста обраде	HRC	Ra, $\mu\text{m}$	Програм таложења	Дебљина $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	HV <sub>0.1</sub>	
112	Брушење, режим A <sub>4</sub>	41	0.870	1	22.48	1.242	1.395	80.0671
126	Брушење, режим A <sub>4</sub>	39	1.330	4	88.90	1.880	1.260	58.9945
92	Брушење, режим A <sub>3</sub>	35	1.230	2	34.00	1.600	1.323	68.2957
124	Брушење, режим A <sub>3</sub>	40	0.940	3	39.70	1.390	1.260	58.9945
94	Брушење, режим A <sub>2</sub>	39	0.990	4	88.90	1.368	1.240	56.2290
56	Брушење, режим A <sub>1</sub>	32	0.850	1	24.76	0.870	1.360	74.1890
54	Полирање	42	0.690	3	39.10	0.870	1.275	61.1271
65	Полирање	30	0.457	2	33.86	0.600	1.350	72.5641



Слика 5.71 Запремина похабаног материјала превлака хрома

Ако се посматра ниво похабаности испитиваних узорача види се да узорци 54, 124 и 126 имају скоро исти ниво похабаности. Ови узорци имају потпуно различите карактеристике подлоге за таложење превлаке, тврдоћа се креће у распону од 39 да 42 HRC, храпавост од 0.690 до 1.330  $\mu\text{m}$ . Дебљина превлака је такође различита и креће се у распону од 39.10 до 88.90  $\mu\text{m}$ . Ове превлаке су таложене густином струје 60  $\text{A}/\text{dm}^2$  и имају вишу тврдоћу. На основу добијених података

може да се закључи да највећи утицај на отпорност на хабање превлака хрома имају параметри таложења. Утицај стање подлоге на коју је исталожена превлака хрома је мањи али не може да се занемари.

Велика тврдоћа превлака хрома условљава добре антифрикционе особине: мали коефицијент трења и велику отпорност према хабању. Колика ће бити отпорност према хабању, зависи од режима хромирања и услова рада делова у контакту (притиска, подмазивања, односа брзина,...). У зависности од режима хромирања и услова експлоатације, отпорност према хабању делова са превлакама хрома повећава се три до пет пута у односу на делове без превлака. Отпорност према хабању превлака хрома повезана је са њиховом тврдоћом и пластичношћу по сложеној зависности. Отпорност према хабању превлака расте са повећањем микротврдоће до око 1000 HV<sub>0.1</sub>. Даље повећање микротврдоће узрокује смањење нивоа отпорности на хабање. Ова појава се доводи у везу са тим да при овим вредностима тврдоћа зрна прелази чврстоћу њихове узајамне везе. У том случају хабање превлака настаје углавном као последица дробљења појединачних зрна [17].

## **6. РАЗВОЈ ЕКСПЕРТНОГ СИСТЕМА У ОБЛАСТИ ГАЛВАНСКИХ ПРЕВЛАКА**

Велики број обрадних система поседује бројне неопходне информације у циљу бољег функционисања, али због неадекватног алата за њихову примену оне постају само трошак и додатно успоравају систем управљања. У савременим обрадним системима примена вештачке интелигенције нуди нову димензију у концепту система управљања, аутоматизације и унапређења производних процеса, па самим тим и процесима наношења и примене галванских превлака.

Вештачка интелигенција као информатичка дисциплина представља област у рачунарству намењену за помоћ при доношењу одлука заснованих на прикупљеном искуству и информацијама, коришћењем функција учења, адаптације, резоновања и самокорекције. Међутим, увођењем вештачке интелигенције у обрадне системе проблеми се не решавају применом једне технике на јединствен начин, већ су у примени различите технике, као што су експертни системи, фази логика, вештачке неуронске мреже и генетски алгоритми. Примена вештачке интелигенције се намеће као један од начина за постизање оптималног квалитета производа, ниских трошкова производње, поштовање рокова испоруке, рационалније управљање материјалним и информацијским токовима у производном систему, уз све израженије притиске глобализације и растућу конкуренцију на тржишту које захтева мале серије и разноликост производа.

Данашњи степен развоја информационих и комуникационих технологија омогућава располагање услуга разних експерата. Међутим, имати поред себе у сваком тренутку експерта није ни мало једноставно, експерата има мало и нису увек доступни а њихове услуге су углавном скупе. Осим тога један експерт не може

поседовати сва нама потребна знања. Примена рачунарских система и софтверских апликација, нарочито оних заснованих на вештачкој интелигенцији, утицала је да се годинама стечана појединачна знања и искуства експерата у области припреме производње, обједине и учине опште доступним и искористе за развој експертних система намењених за експертно закључивање, процењивање и оптимизацију припремних и производних активности.

Под експертним системом се подразумева таква врста програмске подршке или софтвера на рачунару, која у већој или мањој мери замењује човека - експерта. Експертни систем је у стању да, на основу унешених података и уграђених логичких алгоритама (правила закључивања), односно унетих информација базе знања, ефикасно помогне кориснику у решавању специфичних проблема. Експертни систем представља покушај да се у компјутерске програме уграде процеси размишљања и закључивања који се одвијају код експерата. Добре перформансе експертног система су у директној зависности од квалитета знања које је у њега уграђено. Знање се чува у бази знања експертног система и генерално се разликују два типа знања:

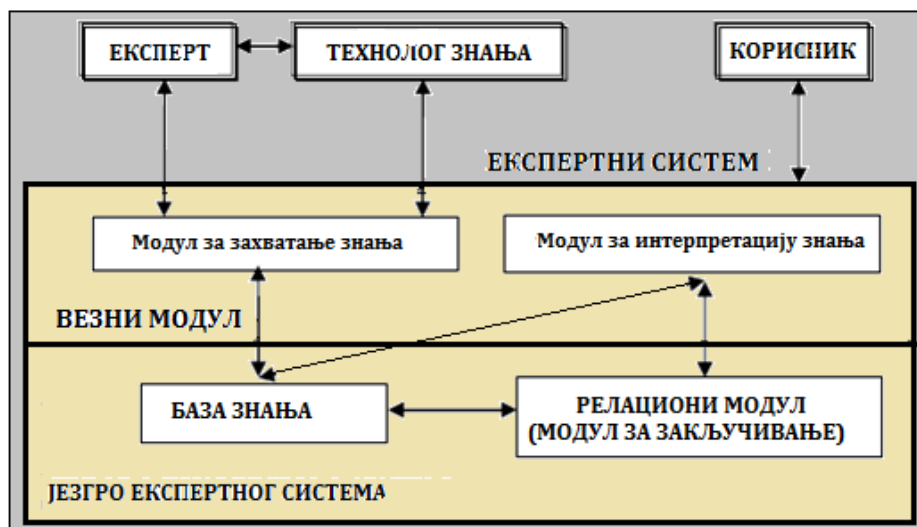
- знање које је широко познато како писано знање и налази се у књигама, уџбеницима, часописима и слично; то знање се најчешће назива **експлицитно знање**,
- знање које човек - експерт гради на основу искуства и које комбиновано са првим типом знања чини човека експертом, овај тип знања се назива **имплицитно или хеуристичко знање**.

Осим знања у експертни систем мора бити уграђен поступак **закључивања - метод расуђивања**, који има функцију да направи спрегу између знања које се чува у рачунару и проблема који поставља корисник. Везни модул спаја експерта и технолога знања, са једне стране и корисника, са друге стране, са базом знања и релационим модулом.

Из тог разлога везни модул се састоји од два мања модула (комуникациона канала) и то:

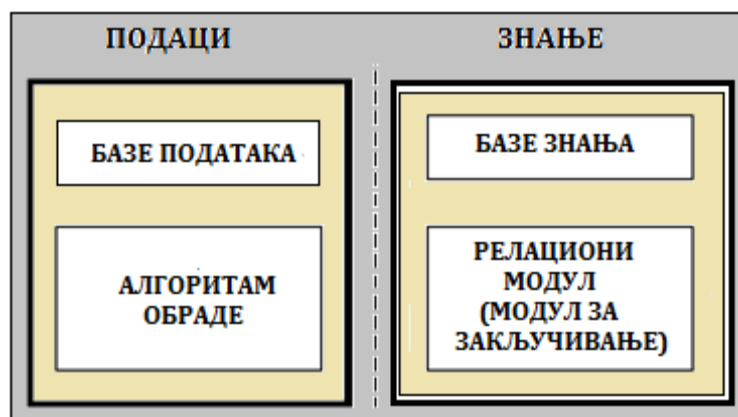
- модула за захватање знања, и
- модула за интерпретацију знања.

Након повезивања ових модула у једну целину, добија се основна структура ЕС, која се може приказати сликом 6.1.



Слика 6.1. Основна архитектура експертног система [82]

Развој експертних ситема има за последицу даљи развој база података и поступака обраде података и појаву база знања и процесирање знања. Постојећа симетрија између база података и обраде података с једне стране и базе знања и процесирања знања, с друге стране, приказана је на слици 6.2.



Слика 6.2. Симетрија између обраде података и процесирања знања [82]

Проблем процесирања знања и његово приказивање су основа на којој се заснива комплетна теорија вештачке интелигенције, односно теорије изградње експертног система. До данас је развијен читав низ метода и програмских алата, где је све базирано на математичким дисциплинама, и то: статистици и теорији вероватноће, матрицама и теорији графова, обичној, вишедимензионалној и тзв. "размазаној" (*fuzzy*) логици, предикатском рачуну, итд.



Временом су се издвојиле поједине методе, које данас доминирају у изградњи језгра експертних система, а то су:

- аутоматско доказивање теорема,
- продукциони системи,
- развој ЕС заснован на математичкој логици,
- семантичке мреже,
- рамови знања (*frames*),
- методе фази експертних система,
- методе за изградњу експертних система заснованих на неуронским мрежама,
- генетички алгоритми и експертни системи,
- агенти, мулти агенти и интелигентни агенти,
- интелигентне базе података и интелигентни информациони системи.

Иако ове методе имају низ додирних тачака и одређена преклапања, оне представљају заокружене целине.

## **6.1 Примена вештачких неуронских мрежа**

У овом поглављу дате су основне информације о теоријским основама вештачких неуронских мрежа и математичка формулација алгоритма простирања грешке уназад. Неуронским мрежама вршена је предикција параметара наношења галванских превлака. Као улазни подаци у неуронску мрежу одабрани су време, јачина струје и храпавост узорака (претходна обрада). Оптимална величина слоја скривених неурона, оптимални нагиб њихове активационе функције и начин нормирања улазних и излазних података, одређен је праћењем нормализованог корена средње квадратне грешке, коефицијената корелације и средње вредности релативне грешке.

### **6.1.1 Вештачке неуронске мреже - основни појмови**

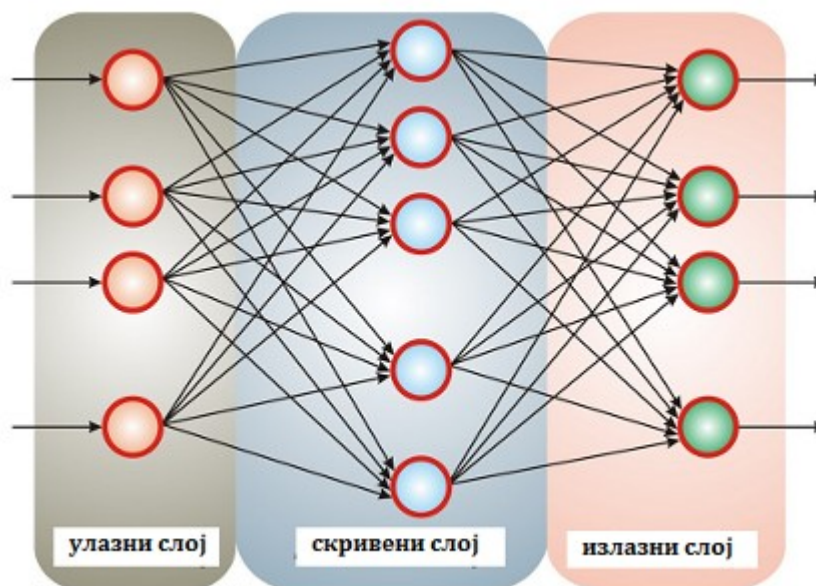
Научна област, данас позната као неуронске мреже, настала је као резултат синтезе неколико веома различитих праваца истраживања: обраде информација, неуробиологије и физике и као таква представљају типичан пример интердисциплинарне области. Ова изучавања представљају покушај да се разуме рад људског мозга, а такође и да се стечена знања примене у обради сложених

информација. Иако постоје и многи други напредни, неалгоритамски системи, као што су генетски алгоритми, адаптивне меморије, асоцијативне меморије, фази логика, општи је утисак да су неуронске мреже за сада најчешће у употреби.

Неуронске мреже се дефинишу на више начина. Према Нехт-Нилсену (*Necht-Nielsen*) [68] неуронске мреже су дистрибуирани, адаптивни, нелинеарни системи изграђени из великог броја различитих процесорских елемената односно неурона. Интензиван развој неуронских мрежа забележен је осамдесетих година прошлог века када настају прве неуронске мреже базиране на алгоритмима учења са простирањем грешке уназад (*back-propagation algorithm*) [87].

У многим пословним апликацијама неуронске мреже су се показале као веома добар рачунарски систем због својства да уче из скупа података, њихове непараметарске природе и могућности да генерализују [104]. Оне се данас срећу у свим сегментима пословања, информационим системима, производним машинским процесима, финансијама, маркетингу итд [1, 3, 7, 11, 16, 26, 27, 103, 110]. Вештачке неуронске мреже су развијене према моделу неуро-биолошких веза неурона људског мозга, иако се од њих знатно разликују. Људски мозак се састоји од веома великог броја међусобно повезаних нервних ћелија - неурона. Биолошке неуронске мреже карактерише међусобна повезаност неурона и јачина веза међу њима, а њихово деловање се временом мења због јачања или слабљења јачине веза. Јачањем или слабљењем веза између биолошких неурона долази до учења. Вештачке неуронске мреже нису ни приближно сложене као мозак. Вештачке неуронске мреже имају способност адаптације и поседују нелинеарност. Могућност адаптације значи да неуронска мрежа може да моделира функцију, и у случају када није позната једначина те функције, већ су познати само примери њеног понашања. Ово неуронским мрежама омогућава предвиђања понашања система на основу претходног понашања, и ова способност учења је изузетно важна приликом решавања многих реалних проблема. Особина нелинеарности неуронских мрежа је такође веома важна, имајући у виду да многе реалне системе карактеришу познате или непознате нелинеарне везе. Приликом решавања нелинеарних проблема, употреба линеарних метода не даје задовољавајуће резултате, због ограничености њихове примене, тако да је алтернатива у виду неуронских мрежа веома важна [54].

Шематски посматрано неуронска мрежа се може представити као орјентисани граф, где чворови представљају неуроне - процесирајуће елементе, а стрелице показују правац протока сигнала, као што је приказано на слици 6.3. Основне компоненте сваке неуронске мреже су: неурон, топологија мреже и алгоритам учења. Као додатне компоненте могу се узети: величина мреже, функционалност неурона, учење/валидност (величина узорка за учење, формат података, итд.), имплементација/реализација (аналогна, дискретна, софтверска, итд.).



Слика 6.3. Општа структура вештачке неуронске мреже [29]

Због великог броја врста неуронских мрежа тешко их је систематично класификовати [29]. Мреже могу бити једнослојне или вишеслојне. Уобичајено је да вишеслојне мреже имају улазни и излазни слој, а између њих су тзв. скривени слојеви. Ако се слојеви мреже повежу на начин да сигнали путују само у једном смеру, од улаза према излазима мреже, тада је реч о статичким или вештачким неуронским мрежама са простирањем унапред (*feed-forward*). Уколико постоје повратне везе (барем једна), реч је о динамичким или повратним вештачким неуронским мрежама са повратним спрегама (*feed-back*). У зависности од подручја примене разликују се перцептронске, асоцијативне, двоструко асоцијативне, адаптивне, когниторске и неокогниторске вештачке неуронске мреже. Неке од вештачких неуронских мрежа се називају према методама које се користе за њихово учење, тако да се разликују повратно пропагиране, супротно пропагиране и статистичке неуронске мреже, док се друге називају према њиховим ауторима, нпр. Кохоненове и Хопфиелдове неуронске мреже.

### 6.1.1.1 Модел статичког неурона

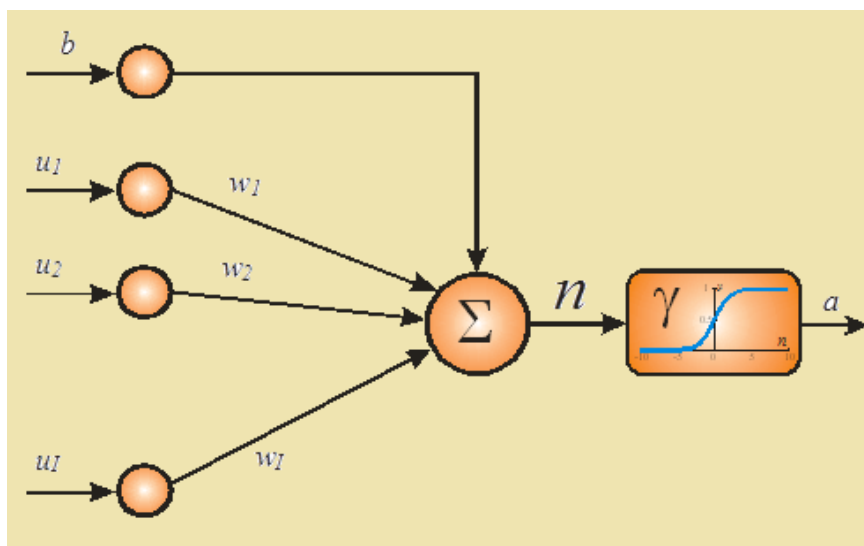
Најпознатија и најчешће коришћена врста вештачких неуронских мрежа је дискретна статичка неуронска мрежа са повратним распрострањањем грешке. На слици 6.4 приказан је стандардни модел статичког вештачког неурона. Излази из других неурона и/или околине посматраног неурона  $u_1, u_2, \dots, u_I$  упућују се неурону, где се множе са тежинским коефицијентима,  $w_1, w_2, \dots, w_I$  те се доводе до суматора. У суматору се тако добијени производи сабирају, па се добијена сума  $n$  доводи на улаз активационе функције  $\gamma$ , која на свом излазу даје излаз неурона  $a$ .

Активација неурона  $n$  има следећи облик [50, 113]:

$$n = \sum_{i=1}^I w_i \cdot u_i + b$$

де је:  $b$  - нагиб који омогућава не-негативну активацију  $n$ , када су сви елементи улазног вектора  $u$  једнаки нули.

На слици 6.4, приказана су основна својства сваког неурона, а то су поседовање више улаза и само једног излаза.



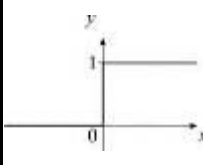
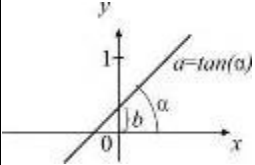
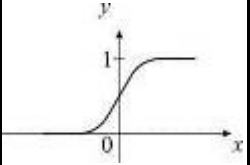
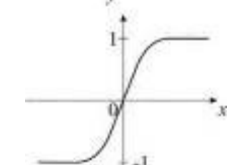
Слика 6.4. Модел статичког вештачког неурона [29]

Излазна вредност неурона  $a$  се рачуна као резултат активације функције  $f(n)$ . Функција  $f$  је позната као функција трансфера и она узима вредност добијену сумирајућом функцијом и предаје је нелинеарној функцији како би створила излазну информацију неурона.

У различитим моделима вештачких неуронских мрежа активационе функције играју веома важну улогу при чему се за активациону функцију, углавном бира нека монотонно растућа функција са засићењем.

У табели 6.1, приказане су најчешће коришћене активационе функције. Сигмоидна функција (3) има предност у односу на остале активационе функције, јер може да подешава велике сигнале без засићења, док истовремено дозвољава пролаз малих сигнала без прекомерног слабљења.

**Табела 6.1.** Најчешће примењиване активационе функције код неуронских мрежа [104]

	1. Одскаочна функција	2. Чиста линеарна функција	3. Сигмоидна функција	4. Тансигмоидна функција
Једначина функције	$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$	$f(x) = ax + b$	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$f(x) = \frac{2}{1 + e^{2x}} - 1$
Област дефинисаности функције	$f(x) \in \{0,1\}$	$f(x) \in (-\infty, +\infty)$	$f(x) \in [0,1]$	$f(x) \in [-1,1]$
Графички приказ функције				

### 6.1.1.2 Грађа вештачких неуронских мрежа

У неуронској мрежи неурони су организовани у поједине слојеве, при чему су, најчешће, сви неурони једног слоја исте структуре. Кључни фактори за одређивање понашања неурона су активационе функције, као и начин међусобног повезивања неурона. У директној интеракцији са околином налазе се улазни и излазни слојеви мреже, док скривени слој не поседује ту могућност. Најчешће коришћен модел вештачке неуронске мреже је **статичка вишеслојна неуронска мрежа са простирањем унапред**. Улазни слој, преко скривених слојева, повезан је са излазним слојем везама које су оптерећене одређеним тежинским коефицијентима. Сви слојеви неуронске мреже потпуно су повезани, тј. сваки неурон посматраног слоја повезан је са сваким неуроном претходног слоја. Изузетак представља тзв. неурон б, који увек има јединичну вредност излаза.

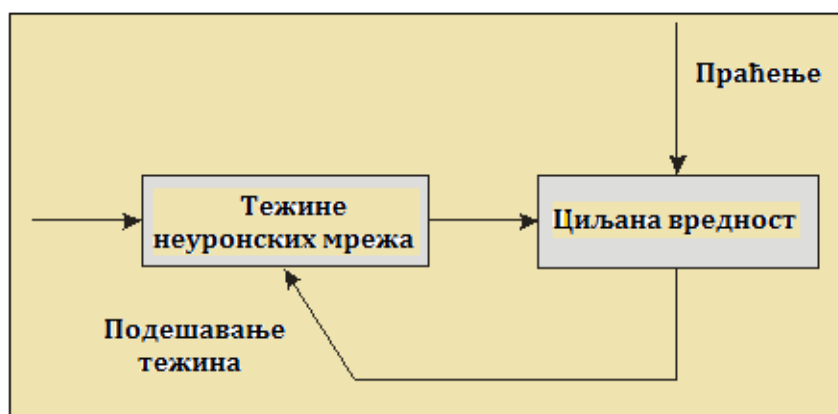
Излазни слој неурона одређује излазе неуронске мреже, а повезан је са скривеним слојем преко тежинских коефицијената. Број улазних и излазних неурона дефинише се у зависности од проблема који треба решити, на начин да је број излазних неурона једнак броју зависних варијабли, док је број улазних неурона једнак броју независних варијабли проблема. У случајевима када се располаже са веома великим бројем улазних варијабли, пожељно је размотрити могућност најповољније композиције модела са одговарајућим бројем варијабли, јер се тиме олакшава примена потребног модела и његова анализа. Оптималан број улазних параметара зависи и од величине скупа за учење - што је већи скуп за учење, могуће је имати више улазних варијабли.

Број неурона у скривеном слоју, као и број скривених слојева није дефинисан проблемом, већ га дефинише корисник који моделира вештачку неуронску мрежу. Доказано је да се свака континуирана функција може добро апроксимирати помоћу само једног скривеног слоја, при чему број неурона у скривеном слоју треба бити довољно велик. Питање броја неурона у скривеном слоју је фундаментално питање, а њихов број зависи од сложености пресликавања улазних на жељене излазне податке, те га је неопходно дефинисати за задани случај. Егзактну анализу је тешко спровести, јер је пресликавање које се остварује неуронском мрежом веома комплексно, као и због стохастичке природе већине алгоритама учења. Практичне препоруке могле би се свести на следећи принцип: пробати са почетним бројем неурона у скривеном слоју знатно мањим од димензије улазног слоја. Ако је учење задовољавајуће, покушати са даљим смањивањем, у супротном, инкрементално повећавати њихов број.

### **6.1.1.3 Тренирања вештачке неуронске мреже**

Тренирање (учење или обучавање) неуронске мреже може се дефинисати као процес мењања тежинских коефицијената унутар мреже, а одвија се као одговор на податке извана, који су представљени улазном слоју. Подаци који се представљају излазном слоју су жељене вредности излазних варијабли. Уколико су оне познате, ради се о тзв. надгледаном тренирању, слика 6.5. Код неких мрежа жељени излаз не мора бити представљен мрежи, а у том случају говори се о тзв. ненадгледаном тренирању. Пре поступка тренирања вештачких неуронских мрежа, неопходно је прикупљене податке о испитиваном проблему поделити у два

одвојена скупа - скуп за тренирање и скуп за тестирање, а уколико се за време тренирања планира коришћење техника за оптимизацију дужине тренирања и структуре мреже, неопходно је поред поменута два скупа формирати и трећи скуп - скуп за коначну валидацију. Правила за ову поделу нема, осим препоруке да се највећи део података остави за тренирање мреже, а мањи део података за тестирање и валидацију. Распоређивање података у скупове врши се случајно, осим код временских серија где треба поштовати временски след настајања проматрања, тј. тренирање мреже треба обављати на старијим, а тестирање на новијим подацима.



Слика 6.5. Процедура тренирања неуронске мреже [29]

У фази тренирања неуронске мреже из скупа за тренирање узимају се вредности улазних варијабли, а затим се помоћу њих рачунају почетне вредности излаза мреже. За овај прорачун потребно је претходно поставити почетне вредности тежинских коефицијената које имају велики утицај на коначно решење тренирања неуронске мреже. Оне се обично иницијализују као мале случајне вредности како не би дошло до заглављивања алгорита у неком од локалних минимума (најчешће у распону од -1 до 1). За скривени слој ове вредности одређују се генератором случајних бројева, док одређивање тежинских коефицијената излазног слоја на поменути начин не осигурава најбржи почетак учења мреже. Почетне вредности тежинских коефицијената могуће је одредити и посебним алгоритмима, који узимају у обзир постављени број неурона у слоју, број улазних варијабли, те највеће и најмање вредности коју поприма свака од улазних варијабли. Најчешће примењивана метода је метода по Nguyenu и Widrowu [63], који су предложили један идејно веома јасан поступак избора почетних вредности. Основна идеја састоји се у подели подручја вредности улазних величина на онолико малих подподручја колико има неурона у унутрашњем слоју мреже и придружи-

вању по једног неурона сваком подподручју. На овај начин осигурава се прекривање читавог подручја улазних вредности активним неуронима, а избегава се да поједини неурони описују једнаке функције, што има за последицу скраћивање процеса учења неуронске мреже у односу на тренирање са случајно постављеним почетним вредностима тежинских коефицијената.

Излази из неурона скривеног слоја, преко тежинских коефицијената излазног слоја, спојени су на улазе неурона излазног слоја. У повратној фази учења вештачке неуронске мреже на основи израчунатих и жељених излаза мреже прорачунавају се грешке учења. На основу грешака учења врши се корекција вредности тежинских коефицијената веза између слојева неурона.

Поступак се понавља за сваки улазно - излазни пар података из скупа за учење, док се не постигне тражена тачност учења. На основу одабране функције циља коригују се тежински коефицијенти помоћу неког од алгоритама нелинеарне оптимизације. Након појединог корака учења, нове вредности тежинских коефицијената рачунају се из претходних вредности, као и из величине њихове промене у том кораку учења. У циљу најбржег смањивања грешке, неопходно је одредити промену тежинских коефицијената за коју је промена грешке максимално негативна. Коефицијент брзине учења је показатељ за меру промене грешке, а његова вредност најчешће се креће у интервалу од  $10^{-3}$  до 10, а одређује се у зависности од решавањег проблема. Учење са прениским коефицијентом брзине учења резултује спорим учењем, док превелике вредности могу узроковати нестабилност учења, односно неуронска мрежа не може конвергирати ка решењу са најмањом грешком. Из тих разлога, пожељно је коришћење променљивог коефицијента брзине учења. Дакле, уколико је однос нове и старе грешке већи од неке претходно дефинисане величине, нове вредности тежинских коефицијената се одбацују, а коефицијент брзине учења се смањује за претходно задати однос, а ако је нова грешка мања од старе, тада се нове вредности тежинских коефицијената прихватају, док се вредност коефицијента брзине учења повећава за унапред задани однос.

Начин ажурирања вредности тежинских коефицијената мреже назива се тренинг алгоритам. Данас се сусрећемо са више тренинг алгоритама предложених у литератури [6, 71, 110]. Најчешће коришћен тренинг алгоритам везује се за *feed-*



*forward* неуронске мреже. Као *feed-forward* мрежа, неуронска мрежа се карактерише у случају када је могуће повезати улазни слој са скривеним слојевима и излазним слојем на тај начин да сваки неурон буде повезан само са неуронима из претходних слојева. Сви алгоритми користе вредност функције грешке како би прилагодили вредности тежинских коефицијената, тако да је функција грешке минимална. Вредност функције грешке мреже одређује се помоћу технике повратног простирања. На овај начин се разлика између излаза из мреже и циљане вредности враћа назад у мрежу, тако да тежински коефицијенти мреже буду постепено прилагођени за стварање излаза који су ближи циљаним вредностима [111].

#### **6.1.1.4 Тестирање и валидација вештачке неуронске мреже**

Друга, одлучујућа фаза за оцену рада вештачке неуронске мреже је тестирање мреже. Разлика између фазе учења и фазе тестирања је у томе што у фази тестирања мрежа више не учи, а то значи да су тежински коефицијенти фиксни на вредностима које су добијене као резултат претходне фазе учења. Дакле, да би се проверила тачност неуронске мреже у одређивању излазних варијабли на основу улазних, неуронској мрежи се представљају нови улазни вектори, који нису суделовали у процесу учења, а од мреже се очекује да за представљени нови улазни вектор произведе излаз. Код поделе доступних података у подскупове, важно их је поделити на начин да се у скупу за учење налазе подаци који су што је могуће више разноврсни, односно који покривају читаво подручје очекиваних вредности улазно - излазних парова и у остала три скупа. Појам генерализације неуронске мреже значи да неуронска мрежа може дати смислен одговор на нови непознати улазни вектор само уколико се тај нови вектор налази близу вектора на којима је мрежа учила или ако се налази између њих. Уколико је нови улаз изразито различит од свих података из скупа за учење, не може се ни очекивати да ће неуронска мрежа на такав улаз дати смислен одзив. Код неуронских мрежа са простирањем грешке уназад, често се јавља проблем претренираности мреже, који карактерише тенденција да се при моделирању даје превелика важност случајним варијацијама вредности података. Такви модели типично имају велику предиктивну тачност на скупу за учење, а значајно нижу на новим, непознатим примерима података или скупу података за тестирање. Како учење неуронске мреже кроз итерацијске кораке напредује, тако се површина вишедимензионалне

активационе функције између улазних и излазних варијабли све више деформише и прилагођава познатим подацима. Међутим, ако се неуронској мрежи исти скуп података веома много пута даје на учење, она се тим подацима може и превише добро прилагодити. Да би се избегла појава претренираности, током учења неуронске мреже, након одређеног броја корака учења, учење се привремено зауставља и помоћу тренутних вредности тежинских коефицијената рачунају се грешке у скупу за валидацију.

#### 6.1.1.5 Процена тачности пресликавања вештачком неуронском мрежом

Оцењивање неуронске мреже врши се прорачуном грешке или неког другог мерила тачности, на начин да се излаз мреже упоређује са стварним излазима. Добијена грешка мреже на скупу за тестирање је резултат којим се тумачи успешност (или неуспешност) неуронске мреже и њена корисност у примени за предикцију на будућим подацима. Као параметар, за процену способности пресликавања неког нелинеарног проблема неуронском мрежом најчешће се користи коефицијент корелације између предвиђених и циљаних вредности на излазу из неуронске мреже -  $R$  и нормализовани корен средње квадратне грешке -  $NRMSE$  (normalised root mean square error“). Поменути параметар се рачуна према једначини:

$$NRMSE = \frac{RMS}{\sigma_{d_n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (d_n - O_n)^2}{N}}}{\sigma_{d_n}},$$

где је:  $N$  - укупан број парова података,

$d_n$  - циљани излази,

$O_n$  - израчунати излази,

$\sigma_{d_n}$  - стандардна девијација циљаних излаза.

Са средњом квадратном грешком и кореном средње квадратне грешке добија се процена грешке у истим јединицама као што је и циљани излаз, док нормализовани корен средње квадратне грешке скалира грешку у бездимензионалан број. За модел који потпуно тачно предвиђа сваку излазну вредност вреди:  $NRMSE = 0$ ,  $R = 1$ . Ако је  $NRMSE = 1$ , тада је  $R = 0$ . Међутим, не постоји јединствена веза између ова два параметра. Нпр. уколико је свака предвиђена излазна вредност тачно

двоструко већа од циљане вредности излаза, тада је коефицијент корелације једнак јединици, али је нормализовани корен средње квадратне грешке већи од нуле. Зато се може закључити да је нормализовани корен средње квадратне грешке бољи индикатор успешности појединог модела неуронске мреже. Коефицијент корелације је и даље користан податак за процену успешности предвиђања зато што је он након квадрирања квантитативно једнак коефицијенту детерминације  $R^2$ . Коефицијент детерминације представља однос протумаченог и укупног збира квадрата одступања, те показује колики се део одступања може протумачити неким примењеним моделом [50].

Предности вештачких неуронских мрежа су следеће: [83].

- могућност да уче из скупа података, њихове непараметарске природе и способности да генерализују,
- аутоматско учење на основу примера,
- брзо учење, код мрежа које имају мање од 50 неурона
- могућност развоја својстава модела, на основу којег ће се вршити предвиђање,
- способност да одговори адекватно на улазне обрасце који се разликују од образаца коришћених у процесу тренирања,
- идентификација нелинеарних феномена.

## **6.2 Моделирање вештачким неуронским мрежама**

Моделирање неуронских мрежа проведено је уз помоћ подскупа за неуронске мреже „Neural Network Toolbox” програмског пакета МАТЛАБ, а примењени су модели двослојних неуронских мрежа са простирањем унапред. За активациону функцију у скривеном слоју одабрана је биполарна сигмоидна, а у излазном слоју линеарна активациона функција. Претходно експерименталним путем добијени подаци, који се односе на карактеристике галванских превлака за различите комбинације полазних података, подељени су у три скупа, за учење, валидацију и тестирање. У циљу избегавања појаве претренираности неуронске мреже, максимални број корака при којима долази до раста грешке у скупу за валидацију је постављен на 5. Дакле, ако је након 5 корака учења порасла грешка у скупу за валидацију, зауставља се даље учење неуронске мреже. У циљу испитивања колико се добро неуронска мрежа прилагодила улазно - излазним паровима

података, односно колико добро мрежа предвиђа излазне параметре на основу задатих улазних вредности, у сва три скупа података извршена је анализа грешака коришћењем: коефицијента корелације -  $R$ . Оптимизација мреже се врши преко броја неурона у скривеном слоју, док је број неурона у излазном слоју дефинисан бројем излазних варијабли и он се не може мењати. Најповољнији број неурона у скривеном слоју одређен је праћењем промене параметара грешке у скуповима за валидацију и тестирање. У излазном слоју неурона постављена је линеарна активациона функција са нагибом  $K_p = 1$ , док је у скривеном слоју постављена биполарна сигмоидална активациона функција. Такође, одређен је и најповољнији почетни нагиб сигмоидалне функције, која резултује најмањом грешком у скуповима за валидацију и тестирање. При свакој промени броја неурона и нагиба активационе функције у скривеном слоју неуронске мреже, постављане су исте почетне вредности тежинских коефицијената, док су пре сваког учења мреже те вредности поновно учитаване.

Реализовано софтверско решење садржи две целине:

- базу података са улазним подацима о карактеристикама делова и површина на које се наносе галванске превлаке и параметри процеса галванизације и излазним подацима о карактеристикама нанетих превлака,
- предвиђање карактеристика превлака на основу унапред задатих параметара процеса галванизације и стања површине на коју се наноси превлака.

Први задатак при реализацији софтверског решења је био израда графичког интерфејса креираног у *MATLab* окружењу, помоћу кога се уносе експериментално добијени подаци.

На слици 6.6 приказано је графичко окружење базе за уношење података.

Након креирања приказаног графичког интерфејса, у оквиру реализације овог софтверског решења унети су подаци из табеле 5.8 (табела са подацима о резултатима наношења превлака хрома на узорке добијене различитим технолошким поступцима обраде).

Реализовано софтверско решење омогућује унос података, претраживање података и предвиђање. Унети подаци могу бити добијени експерименталним

путем (испитивањима као штупу су испитивања реализована у овој дисертацији), а такође могу бити и из производних услова. Основу унетих података чини шифра дела и за њу су везани сви остали подаци.

The screenshot shows a software window titled "prevlake\_hroma". The interface is organized into several sections:

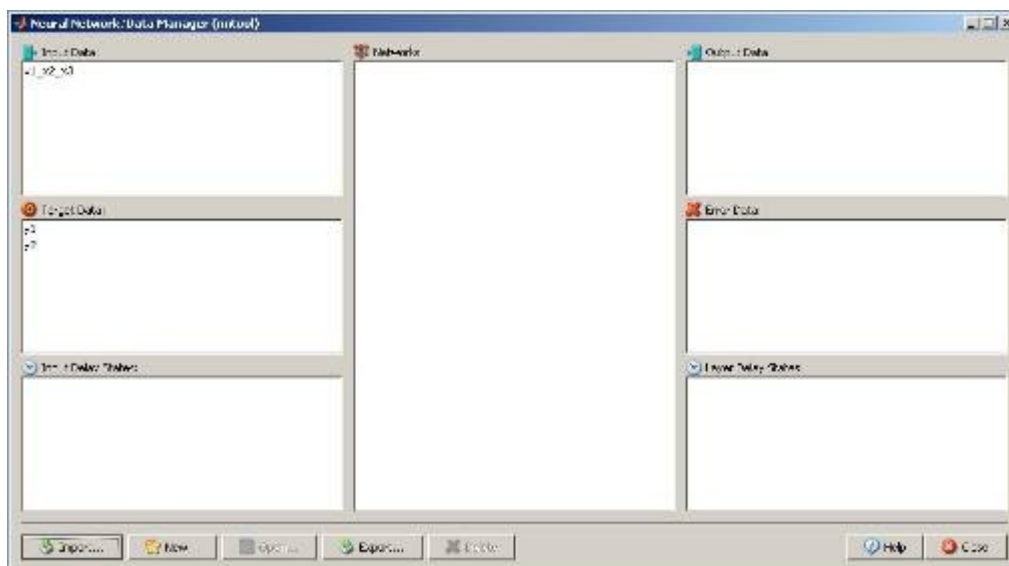
- Karakteristike dela:** Fields for "Šifra", "Materijal", "Ra,  $\mu\text{m}$ ", and "Tvrdoća".
- Parametri galvanizacije:** Fields for "Vrsta", "Elektrolit", "Jacina struje, A", and "Vreme, t".
- Vrsta obrade:** A single text input field.
- Rezultati:** Fields for "Debljina prevlake,  $\mu\text{m}$ ", "Ra,  $\mu\text{m}$ ", "Koroziona otpornost", and "Mikrotvrdoća HV".
- Triboloske karakteristike:** Fields for " $\mu$ ", "h", and "Vh".
- Athezione karakteristike:** Fields for "LC1", "LC2", "LC3", and "Topla proba".
- Napomena:** A large text area for notes.
- Datum:** A text input field for the date.

At the bottom of the window, there are three buttons: "Unos podataka", "Pretraživanje baze", and "Predviđanje".

Слика 6.6. Графички кориснички интерфејс у MATLab-у

Претраживање базе података се врши преко шифре дела. У следећем кораку развоја овог софтверског решења предвиђено је да се претраживање може вршити и на основу карактеристика превлака (дебљине и храпавости).

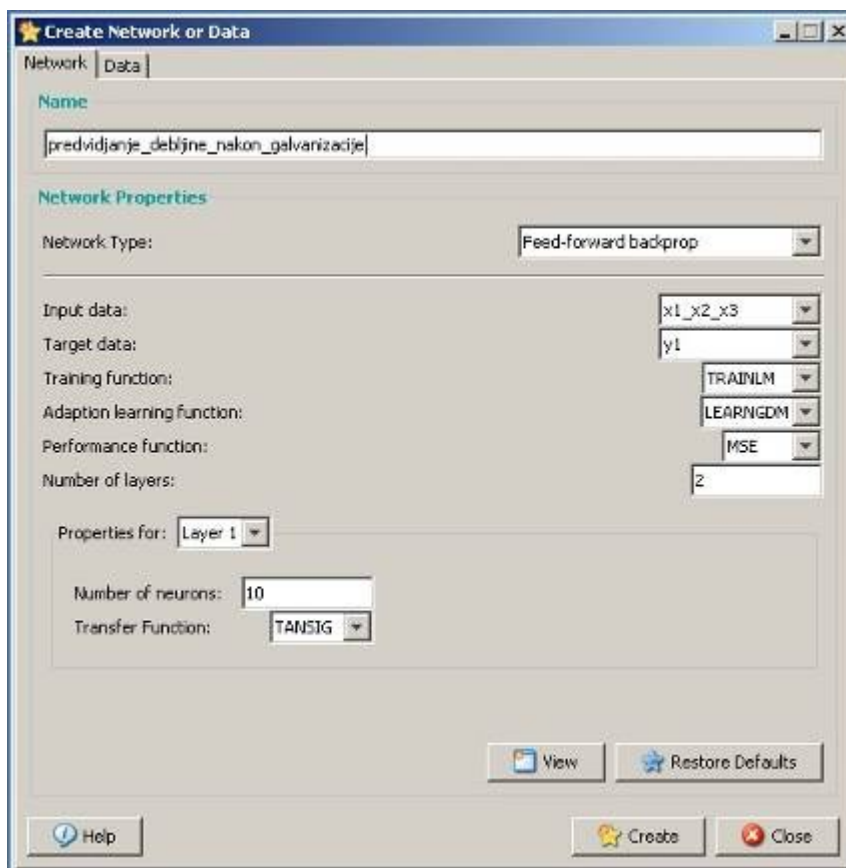
Модул за предвиђање карактеристика превлака је реализован применом вештачких неуронских мрежа. Избором иконе *Предвиђање* покреће се кориснички интерфејс који прво тражи уношење података о карактеристикама дела и параметрима галванизације, након чега се покреће тренирање вештачке неуронске мреже на основу расположивих података из базе података, слика 6.7.



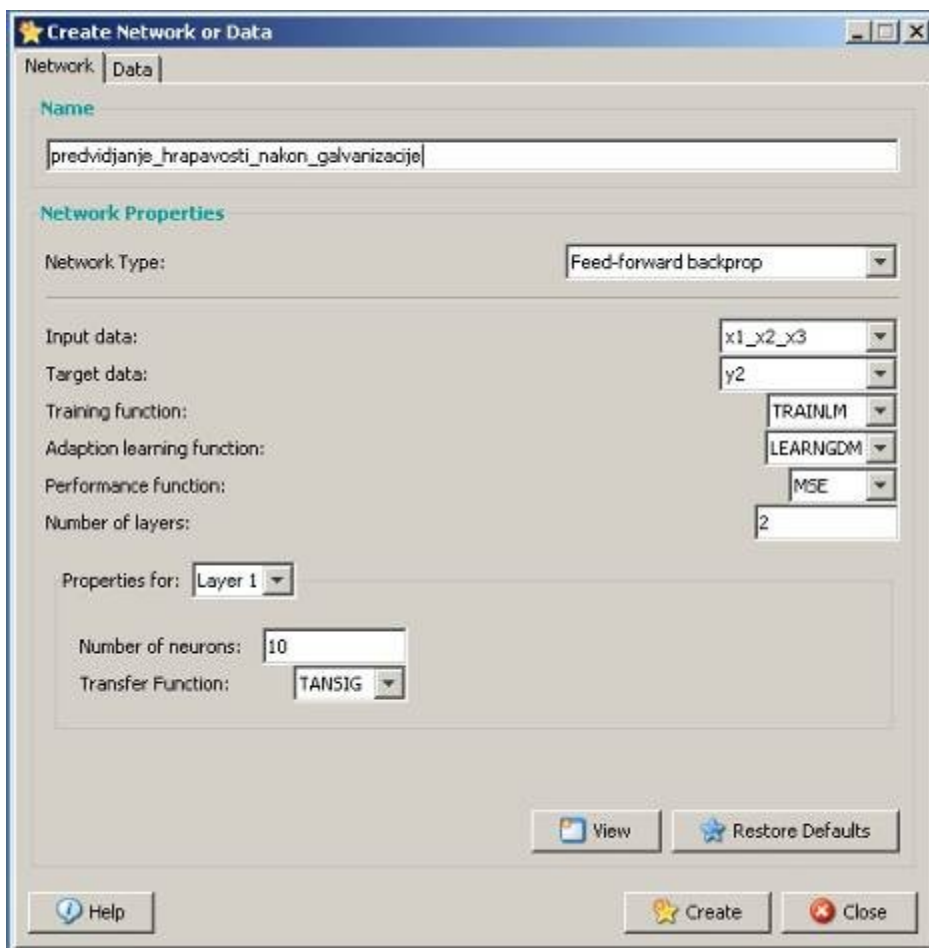
Слика 6.7. Маска за позивање полазних података

Реализована апликација омогућава да се на основу полазних података које чине подаци о храпавости површине на коју се наноси превлака, време и струја галванизације предвиђа дебелина превлаке и храпавост површине превлаке.

На слици 6.8 и 6.9 су приказани графички интерфејси који омогућавају избор полазних података, регресионог модела за предвиђање.

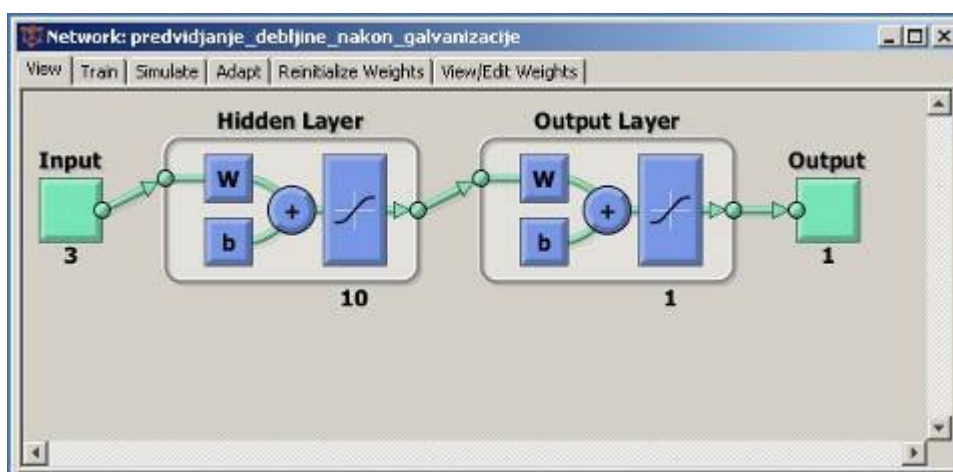


Слика 6.8. Креирана мрежа за предвиђање дебелине наношења превлаке



Слика 6.9. Креирана мрежа за предвиђање храповости након nanoшења превлаке

На слици 6.10 је приказана структура истрениране вештачке неуронске мреже за предвиђање карактеристика превлаке. Мрежа се састоји из два слоја, скривеног слоја са 10 и излазног слоја са 1 неуроном.



Слика 6.10. Изглед креиране мреже са два слоја

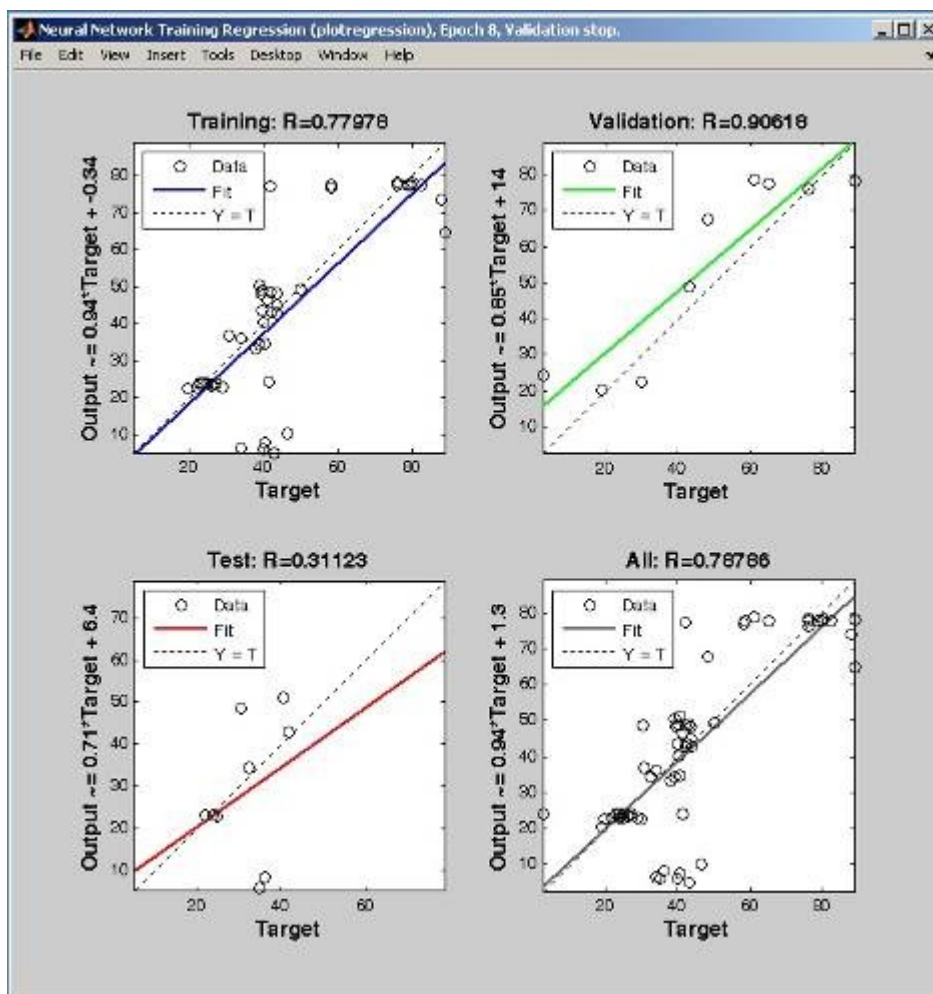
Након креирање и тренирања мреже добијени су одговарајући резултати у виду графичког приказа корелације између излаза неуронске мреже и циљаних

вредности. Графички приказ корелације указује на постојеће неслагање између вредности излаза неуронске мреже и циљаних вредности. У идеалном случају, све приказане тачке се налазе груписане око приказане пуне линије, тачке које се не налазе на линији и удаљене су од ње представљају грешку неуронске мреже. У случају да су грешке велике и мрежа не даје задовољавајуће резултате потребно је извршити одговарајуће промене, тј. променити број неурона у слојевима неуронске мреже, променити број слојева, променити тренинг функцију, повећати узорак испитивања итд., и коначно поново извршити креирање и тренирање мреже. Сваки пута када се мрежа креира, параметри мреже су различити и могу дати различите резултате. Четири приказана графика представљају утврђене вредности корелација након тренирања, валидације, тестирања мреже и укупну корелацију. Испрекиданом линијом на сваком графику представљен је перфектан резултат тј. излаз из мреже је једнак циљаној вредности. Пуна линија представља најбољу регресиону линију између излаза и циљаних вредности. Вредност  $R$  указује на везу између излаза и циљева. У случају да је  $R=1$  као и код статистичке корелације веза између излаза и циљаних вредности је идеално линеарна. У случају да је  $R=0$  веза између излаза и циљаних вредности не постоји.

Коефицијент корелације са вредношћу од  $R>0.5$  говори о томе да корелација постоји и да је средњег нивоа, као прихватљива вредност коефицијента корелације која указује на поуздано предвиђање неуронске мреже може се узети вредност  $R>0.70$ .

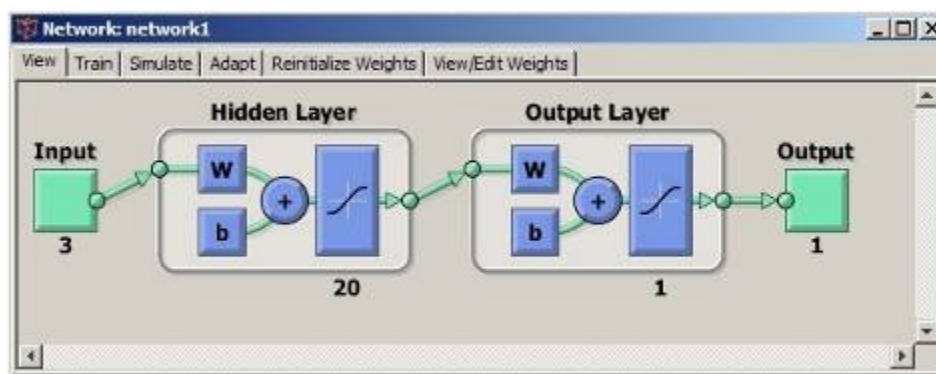
На слици 6.11 приказане су корелације за сва четири случаја тренинга, валидације и тестирања мреже, као и укупни коефицијент корелације између предвиђене вредности и измерене вредности дебљине превлаке и  $R_a$  - храпавости површине. У случају скупу за тренирање, са припадајућим регресионим правцем, коефицијент линеарне корелације јесте  $R=0.77978$ , што се може прихватити као задовољавајући резултат. Исто важи и за вредност коефицијента корелације у случају валидације, чија је вредност  $0.90618$ , што указује на то да су резултати веома добри. Међутим вредност коефицијента корелације у случају тестирања је  $R=0.31123$ , што указује на расипање резултата при тестирању, па се мрежа не може прихвати као поуздана за предвиђање дебљине превлаке, иако је укупна вредност коефицијента корелације  $R>0.78786$ .





Слика 6.11. Резултати тренирања мреже за предвиђање дебљине превлаке

На основу претходно наведеног, извршено је додатно подешавање мреже, тј. повећан је број неурона у скривеном слоју на 20 и накнадно је извршено поновно тестирање.

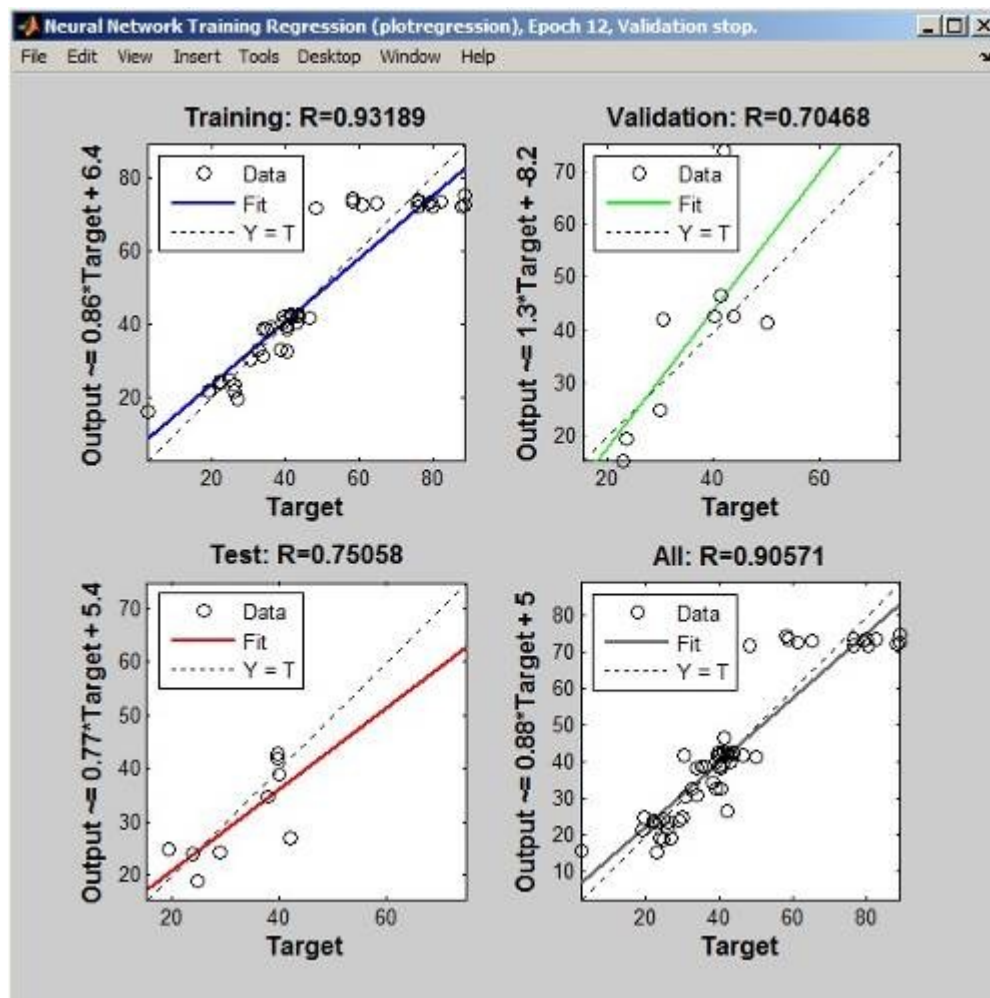


Слика 6.12. Повећан број неурона у скривеном слоју неуронске мреже на 20

Након креирања приказаног графичког интерфејса, у оквиру реализације овог софтверског решења унети су подаци из табеле 5.8 (табела са подацима о

результатима наношења превлака хрома на узорке добијене различитим технолошким поступцима обраде).

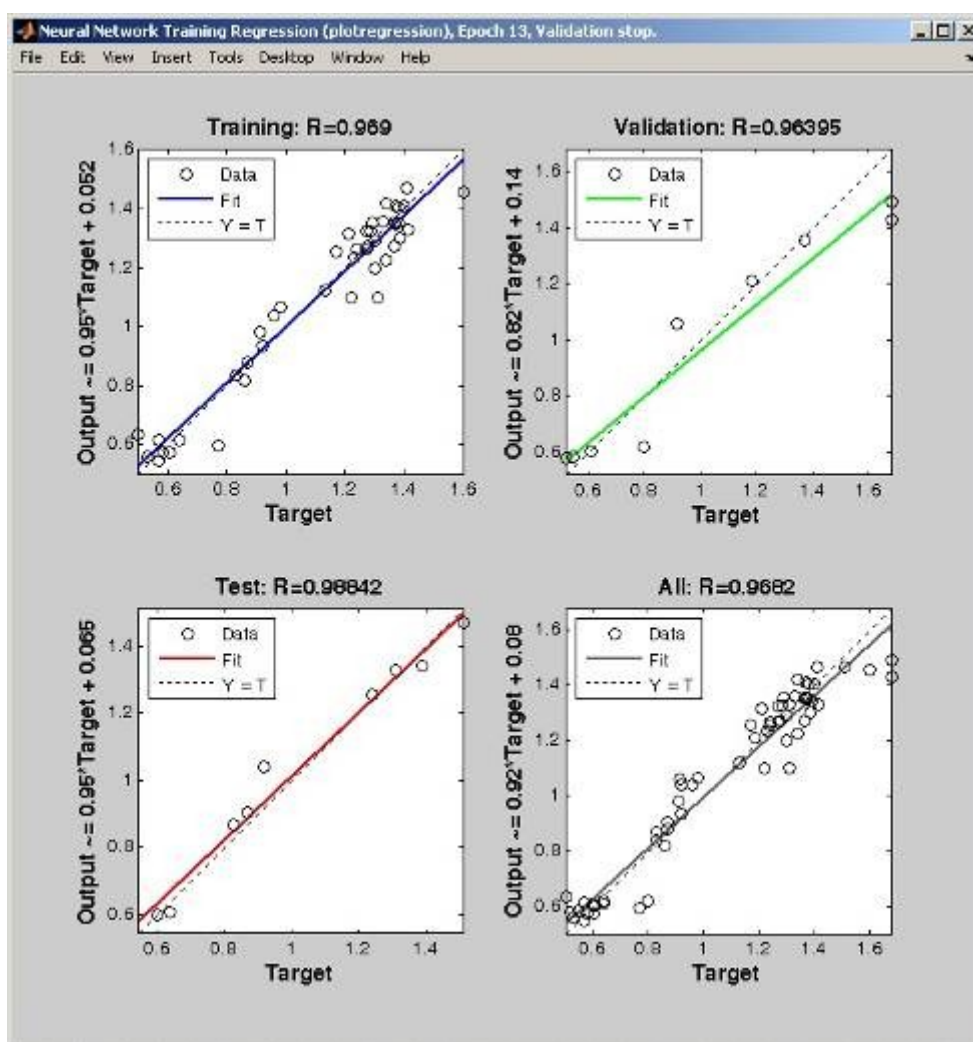
Реализовано софтверско решење омогућује унос података, претраживање података и предвиђање. Унети подаци могу бити добијени експерименталним путем (испитивањима као што су испитивања реализована у овој дисертацији), а такође могу бити и из производних услова. Основу унетих података чини шифра дела и за њу су везани сви остали подаци.



Слика 6.13. Резултати тренирања мреже за предвиђање дебљине превлаке са повећаним бројем неурона у скривеном слоју неуронске мреже на 20

На слици 6.13 приказани су резултати накнадно истрениране мреже, коефицијенти корелације су у сва три случаја тренинга (0,93189), валидације (0,70468) и тестирања (0,75058) задовољавајући. Тако да је и укупни коефицијент корелације  $R > 0.9$ , па се може закључити да је постигнута веома добра корелација између измерених вредности и вредности добијених помоћу неуронске мреже.

Слично, као у претходном случају, на слици 6.14 приказана је корелација између предвиђених и измерених вредности храпавости површине превлаке за тренирање ( $R=0.969$ ), валидацију ( $R=0.96395$ ) и тестирање ( $R=0.98842$ ). Поред тога, приказан је и правац корелације између предвиђених и измерених података, као и вредност коефицијента укупне корелације ( $R=0.9682$ ). Како је вредност коефицијента у сва четири случаја  $R > 0.9$  може се закључити да је постигнута веома добра корелација између измерених вредности и вредности добијених моделирањем неуронским мрежама.



Слика 6.14. Резултати тренирања мреже за предвиђање храпавости површине превлаке

На основу добијених резултата, приказаних графички, може се закључити да је развијена апликација за примену вештачких неуронских мрежа, пружа могућност предвиђања величина као што су параметри квалитета галванских превлака: дебљина и храпавост.

## 7. ЗАКЉУЧАК

У раду је испитиван утицај фактора процеса обраде подлоге за таложeње галванских превлака цинка и хрома на њихове карактеристике. Превлаке су таложене на подлоге различите тврдоће и храпавости.

На основу спроведених експерименталних испитивања и анализе добијених резултата могу се извести одређени закључци, за превлаке цинка су:

- Превлаке су таложене у алкалном раствору на температури 20°C, уз константну струју таложeња. По површини превлака нема дендрита, прегорелих и непокривених места. Време таложeња је варирано, па су добијене превлаке различите дебљине.
- Превлаке су равномерно распоређене по површини подлоге, што се види и са графичких приказа распореда дебљине по површини подлоге. Код свих узорака, део који одговара доњој ивици има веће вредности дебљине у односу на остале делове.
- Обзиром да су све превлаке цинка исталожене у истим условима (густина струје таложeња, алкални раствор), морфологија зависи само од храпавости површине и времена таложeња, односно мења у зависности од начина завршне обраде основног метала-подлоге.
- Превлаке таложене на полираним и брушеним подлогама имају добру покривеност, равномерно су распоређене по површини, хомогене су и имају релативно глатку површину.
- Код превлака таложених на пескареним и глоданим подлогама топографија превлаке јасно прати топографију подлоге. Ове превлаке имају добру

покривеност, равномерно су распоређене по површини, хомогене су и грубе.

- Приањање превлака цинка за основни метал испитивано је на два начина, методом загревања и "scratch" тестом.
- ✓ Приањање исталожених превлака цинка је добро, при испитивању нису уочене промене на превлаци које указују на одвајање превлаке од основног материјала, подлоге.
- ✓ Када је у питању "scratch" тест реализована испитивања су показала да се ова метода не може са успехом користити за испитивање адхезионих својстава превлака цинка исталожених електрохемијским путем. Превлаке цинка имају малу тврдоћу, због чега при испитивању долази до одношења превлаке или утискивања у неравнине подлоге.
- Корозиона стабилност превлака цинка одређена је у складу са стандардима SORS 1633, излагањем превлака дејству раствора натријум-хлорида. Критеријум за процену корозионе стабилности је био период времена после ког се на превлаци појављују први црвени продукти корозије, односно период у коме долази до корозије основног метала на 5% површине. Сви испитивани узорци су задовољили услове стандарда.

Када су у питању триболошка испитивања превлака цинка:

- Вредности коефицијента трења су уједначене, осим за превлаке исталожене на подлогама добијеним глодањем и grubим брушењем које су доста храпаве. Топографија ових превлака прати топографију подлоге.
- На основу добијених резултата није могуће успоставити везу између параметара подлоге и начина њиховог добијања са интезитетом хабања. Утицај технолошког наслеђа се огледа само у режиму таложења превлаке и врсти електролита.

На основу спроведених експерименталних испитивања и анализе добијених резултата за превлаке хрома може се закључити следеће:

- Превлаке хрома таложене су у програмираном режиму једносмерне струје у хроматно-сулфатном раствору на температури 55°C, уз промену густине струје таложења од 30 до 60 Adm<sup>-2</sup>.

- Превлаке хрома таложене са струјом густине  $30 \text{ Adm}^{-2}$  су светле, чисте, са финим прскотинама по целој површини. Ивични ефекат није изражен.
- Код превлака таложених са густином струје од  $60 \text{ Adm}^{-2}$  талог уз ивицу је грубљи и храпавији. Ивични ефекат је јако изражен, нарочито код превлака таложених по програму 4 (360 минута).
- Појаву ивичног ефекта потврдили су резултати мерења дебљине превлака по површини узорка (на 15 места). Графички модели урађени на основу тих мерења дају сликовит приказ ивичног ефекта. Неравномерност расподеле дебљине превлаке по површини узорка последица је како слабе таложне моћи хроматно-сулфатног електролита, тако и чињенице да искоришћење струје зависи од густине струје.
- Приањање превлака хрома за основни метал испитивано је на два начина, методом загревања и "scratch" тестом.
  - ✓ Приањање исталожених превлака хрома је добро, испитивањем нису уочене промене на превлаци које указују на одвајање превлаке од основног материјала-подлоге.
  - ✓ Анализом резултата "scratch" тестом потврђена је хипотеза о утицају претходне обраде (храпавости) на карактеристике превлака.
  - ✓ Вредности критичних сила  $L_c$  опадају са порастом храпавости што је у сагласности са резултатима добијеним у истраживању [28].
  - ✓ Вредности критичних сила  $L_c$  расту са порастом тврдоће подлоге на којој је превлака исталожена.
  - ✓ Код узорка приближних карактеристика подлоге и дебљине превлака, вредности критичних сила се разликују у интервалу од 5-10%.
  - ✓ Вредност критичне силе разарања не зависи од дебљине превлаке при истим осталим утицајним факторима.
- Превлаке таложене једносмерном струјом при густинама од 20 до  $100 \text{ Adm}^{-2}$  имају високу тврдоћу од 800 до  $1000 \text{ HV}_{0.1}$ . Превлаке током експеримента таложене струјом од  $30 \text{ Adm}^{-2}$  имају тврдоћу 870 -  $900 \text{ HV}_{0.1}$ , а превлаке таложене струјом од  $60 \text{ Adm}^{-2}$  имају тврдоћу 900 -  $970 \text{ HV}_{0.1}$ .

- Испитивањем морфологије превлака уочено је да се морфологија превлаке хрома мења са променом топографије подлоге и густине струје. Морфологија се мења и са променом области дебљине на истом узорку. У средини узорка је фина структура са финим прскотинама док према крајевима узорака превлака постаје грубља а прскотине веће.

Када су у питању триболошка испитивања превлака хрома:

- Вредности коефицијента трења крећу се у границама од 0.73 до 0.88 и у сагласности су са резултатима добијеним у досадашњим истраживањима [22, 33, 59].
- На отпорност према хабању највећи утицај имају параметри таложења.

Свеобухватном анализом резултата утврђен је утицај стања површине на поједине карактеристике електролитичких превлака цинка и хрома.

Када је у питању развој експертног система у области галванских превлака:

- Реализовани модул за предвиђање квалитета превлака (дебљина, храпавост) на основу полазних података показао је висок степен корелације, чиме је потврђена могућност примене неуронских мрежа за ову намену.
- Применом развијеног модула могуће је успешно предвидети карактеристике галванских превлака.

Резултати добијени у истраживању недвосмислено показују да је постигнут напредак у сагледавању утицаја технолошког наслеђа на карактеризацију галванских превлака. Исто тако, јављају се и нови задаци којима би требало у будућности посветити више пажње. Предмети и правци даљег истраживања могу бити:

- Испитивање отпорности превлака хрома на деловање гасова високог притиска и температуре,
- Истраживање утицаја параметара подлоге и таложења на карактеристике других галванских превлака, никла и легура на бази цинка и хрома,
- Истраживање примене вишеслојних галванских превлака,
- Наставак рада на реализацији развоја експертног система у области галванских превлака.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

1. **Abrahams A., Coupey E., Zhong E., Barkhi R., Manasantivongs P.:** Audience targeting by B-to-B advertisement classification: A neural network approach. *Expert Systems With Applications*, 40(8), 2013.
2. **Аверченков В. И.:** Технологическая наследственность в машиностроении, Наука и техника, Минск, 1997.
3. **Alfaro E., GarciaN., Gamez M., Elizondo D.:** Bankruptcy forecasting: An empirical comparison of AdaBoost and neural networks, *Decision Support Systems*, 45(1), 2008.
4. **Alfantazi A., Brehaut G., Erb U.:** The effects of substrate material on the microstructure of pulse-plated Zn-Ni alloys, *Surface and Coatings technology*, Volume 89, Issue 3, 1997.
5. **Арсеновић Б., Павловић Љ., Томић М., Николић Н., Павловић М.:** Утицај стања површине метала на сјај и структуру металних превлака, I - део: површинска рефлексивност светлости, *Заштита материјала* 48, број 4, 2007.
6. **Askarzadeh A., Rezazadeh A.:** Artificial neural network training using a new efficient optimization algorithm, *Applied Soft Computing*, 13(2), 2013.
7. **Ahn, B., Cho, S., Kim, C.:** The integrated methodology of rough set theory and artificial neural network for business failure prediction, *Expert Systems With Applications*, 18(2), 2000.
8. **Бабич М., Митровић С.:** Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легура, *Машински факултет, Крагујевац*, 2007.
9. **Вajat J.:** Prevlake legura cinka-elektrohemijsko dobijanje i koroziona stabilnost, *Savez inženjera i tehničara za ZM Srbije*, Beograd, 2009.
10. **Богуслаев А.Б., Качан Я. А., Мозговой Ф. В.:** Финишные технологии обработки деталей гтд, *Вестник двигателестроения*, 1, 2009.
11. **Brouthers L., Mukhopadhyay S., Wilkinson T., & Brouthers K.:** International market selection and subsidiary performance: A neural network approach. *Journal Of World Business*, 44(3), 2009.



12. **Бучко М., Томић М., Стојановић М., Павловић М., Бајат Ј.:** Електро-хемијско таложење и корозиона стабилност превлака Zn-Mn легура, Заштита материјала, Вол. 51, број 2, 2010.
13. **Васиљевић Б., Недић Б.:** Модификовање површина, Машински факултет и Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 2003.
14. **Venkatesan D., Kannan K., Saravanan, R.:** A genetic algorithm-based artificial neural network model for the optimization of machining processes, *Neural Comput& Application*, 18(2), 2009.
15. **Вујачић В.:** Корозија и технологија заштите метала, Војна академија, Београд, 2002.
16. **Gan C., Limsombunc V., Clemes M., Weng A.:** Consumer Choice Prediction: Artificial Neural Networks versus Logistic Models. *Journal Of Social Sciences*, 1(4), 2005.
17. **Gawne D. T.:** Friction and Wear of Chromium and Nickel Coatings, *Wear*, Vol.129, 1989.
18. **Гимберг М.:** Галванотехника, Металургија, Москва, 1987.
19. **Greul T., Gerdenitsch J., Commenda C., Sagl R., Arndt M., Duchoslav J., Walter Hassel A.:** Coating substrate relationship after initial electrolyte contact in the electrodeposition of zinc on steel, *Surface and Coatings Technology*, Volume 253, 2014.
20. **Грилихес Я. С., Тихонов И. К.:** Электролитические и химические покрытия, Химия, Ленинград, 1990.
21. **Дальский А. М., Базров Б. М., Васильев А. С. и др. .:** Технологическая наследственность в машиностроительном производстве/. М.: МАИ, 2000.
22. **Darbeida A., Stebut J., Barthol M., Belliar P., Lelait L., Zacharie G.:** Comparative tribological study of chromium coatings with different specific hardness, *Surface and Coatings Technology*, 68/69, 1994.
23. **Devanney J.:** The Impending Disasters in Tankers, CTX Press, USA, 16, 2006.
24. **De Rossetn W, Montgomery J.:** Cobalt-base alloy gun barrel study, *Wear* 316, 2014.
25. **Dubpernell G.:** Electrodeposition of Chromium from Chromic Acid, Solution, Pergamon Press, Inc., 1977.
26. **Du, K.:** Clustering: A neural network approach, *Neural Networks*, 23(1), 20010.
27. **Dvir D., Ben-David A., Sadeh A., &Shenhar A.:** Critical managerial factors affecting defense projects success: A comparison between neural network and regression analysis. *Engineering Applications Of Artificial Intelligence*, 19(5), 2006
28. **Zivic F., Babic M., Adamovic D., Mitrovic S., Todorovic P., Favaro G., Pantic M.:** Influence of the surface roughness on adhesion of Chrome coatings on alloy tool steel X165CrMoV12, *Journal of the Balkan Tribological Association* Vol. 18, No 2, 2012.

29. **Жмак И.:** Предвиђање својстава материјала неуронским мрежама, магистарски рад, ФСБ, Загреб, 2003.
30. **Ђорђевић С.:** Металне превлаке, Техничка књига, Београд, 1970.
31. **Ђуровић М., Радовић Г.:** Декоративне и техничке превлаке никла - утицај адитива и услова рада, Заштита материјала, Вол. 48, број 4, 2007.
32. **Zeng Z., Wang L., Liang A., Zhang J.:** Tribological and electrochemical behavior of thick Cr–C alloy coatings electrodeposited in trivalent chromium bath as an alternative to conventional Cr coatings, *Electrochimica Acta* 52, 2006.
33. **Zeng Z, Zhang J:** Correlation Between the Structure and Wear Behavior of Chromium Coatings Electrodeposited from Trivalent Chromium Baths, *Tribol Letters* 30, 2008.
34. **Зинченко В. М.:** Технологичность и технологическая наследственность основа формирования свойств деталей, *Технология металлов*, Но 4, 2007.
35. **Зинченко В. М.:** Технологическая наследственность при изготовлении деталей, *Технология металлов*, Но 5, 2007.
36. **Есих И.:** Технологија заштите од корозије, Школска књига, Загреб, 1990.
37. **Ивковић Б., Рац А.:** Трибологија, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995.
38. **Јаковљевић С.:** Утјецај двоструког превлачења на механичка и триболошка својства керамичких превлака, дисертација, ФСБ, Загреб, 2007.
39. **Јовановић Д., Недић Б.:** Могућност побољшања триболошких својстава унутрашње трасе цеви стрелачког оружја, *Зборник радова: ДЕМИ' 07*, Бањалука, 2007.
40. **Јовановић Д., Недић Б.:** Хабање унутрашње трасе цеви стрелачког оружја, *Зборник радова: СЕРБИАТРИБ' 07*, Крагујевац, 2007.
41. **Јовановић Д., Недић Б.:** Утицај технологије израде на радне карактеристике машинских елемената, *Зборник радова: 33. Саветовање производног машинства, са међународним учешћем*, Београд, 2009.
42. **Jovanovic D., Nedic B., Cupovic M.:** Influence of the technological heritage on life cycle of machine elements: *Proceedings: MMA' 09*, Novi Sad, 2009.
43. **Јовановић Д., Недић Б., Чуповић М., Марушић В.:** Утицај површине подлоге на карактеристике превлака цинка, *Зборник радова: СЕРБИАТРИБ' 13*, Крагујевац, 2013.
44. **Јовановић Д., Недић Б.:** Scratch тест превлака хрома, *Зборник радова: 39. ЈУПИТЕР конференција са међународном учешћем*, Београд, 2014.
45. **Jovanović D., Nedić B., Rozing G.:** Tribological Properties Of Zinc Coatings, *Proceedings: 14<sup>th</sup> International Conference on Tribology, SERBIATRIB'15*, Belgrade, Serbia, 2015.

46. **Ящерицын П. И.:** Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей, Наука и техника, Минск, 1971.
47. **Ящерицын П. И., Скорынин В. Ю.:** Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин, Наука и техника, Минск, 1977.
48. **Ящерицын П. И.:** Технологическое наследование эксплуатационных параметров деталей машин. Справочник, Инженерный журнал, № 9, 2004,
49. **Каданер И. Л.:** Равномерность гальванических покрытий, Универзитет у Харкову, Харков, 1980.
50. **Kalyvas E.:** Using Neural Networks and Genetic Algorithms to Predict Stock Market Returns (MSc), Faculty of Science and Engineering, Department of Computer Science, University of Manchester, 2001.
51. **Колумбић З., Томац Н.:** Материјали-подлоге за дискусију; Свеучилиште у Ријеци; Филозофски факултет, Одсек за политехнику, Ријека, 2005.
52. **Кудрявцев Н. Т.:** Электролитические покрытия металлами, Москва, 1979.
53. **Kumar S.:** Neural networks: a classroom approach, Tata McGraw-Hill Education, 2004.
54. **Li S., Wunsch D., O’Hair E., Giesselmann M.:** Comparative Analysis of Regression and Artificial Neural Network Models for Wind Turbine Power Curve Estimation, J. Sol. Energy Eng., 2001.
55. **Лазих М.:** Технологија обраде метала резањем, Машински факултет и Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 2002.
56. **Liang A., Ni L., Liu Q., Zhang J.:** Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr(III) electrolyte, Surface & Coatings Technology 218, 2013.
57. **Lima-Neto P, Correia A, Colares R, Araujo W.:** Corrosion Study of Electrodeposited Zn and Zn-Co Coatings in Chloride Medium, J. Braz. Chem. Soc., Vol. 18, No. 6, 2007.
58. **Leisner P., Bech -Nielsen G., Moller P.:** Current Efficiency and Crystallization Meshanism Pulse Plating of Hard Chromium, J. Appl. Electrochemistry, 17, 1993.
59. **Martinković M, Kottfer D, Ferdinandy M, Maňková I.:** The characterization of electroplated Cr coating, Electrochimica Acta. 52, 2006.
60. **Мельников С. П.:** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении, Москва, 1979.
61. **Mitrović S., Babić M., Adamović D., Živić F., Džunić D., Pantić M.:** Wear Behaviour of Hard Cr Coatings for Cold Forming Tools Under Dry Sliding Conditions, Tribology in Industry, Vol. 34, No 1, 2012.
62. **Morisset P., Oswald J., Draper C.:** Chromium plating, Endland, 1954.
63. **Nguyen D., Widrow B.:** Improving the learning speed of 2-layer neural

- networks by choosing initial values of the adaptive weights. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 1990.
64. **Nedić B., Jovanović D., Lakić-Globočki G.:** Influence of Previous Machining on Characteristics of Galvanic Coatings, Proceedings: SERBIATRIB-11, Kragujevac, 2011.
  65. **Nedić B., Jovanović D., Lakić-Globočki G.:** Scratch Testing of Zn Coating Surfaces, Proceedings: 34<sup>th</sup> International Conference On Production Engineering, Niš, 2012.
  66. **Nedic B., Jovanovic D., Marušić V.:** Some Scratch Test Research Results Zn Coatings, Proceedings: MMA' 12, Novi Sad, 2012.
  67. **Nedić B., Jovanović D., Čupović M.:** Characteristics of Chromium Coatings Programmed Current Regime, Proceedings: 35<sup>th</sup> International Conference On Production Engineering, Kraljevo-Kopaonik, 2013.
  68. **Necht-Nielsen, R.:** Counterpropagation networks, Applied Optics, Vol. 26, Issue 23, Optical Society of America, 1987.
  69. **Ortiz Z., P. Díaz-Arista P., Meas Y., Ortega-Borges R., Trejo G.:** Characterization of the corrosion products of electrodeposited Zn, Zn-Co and Zn-Mn alloys coatings, Corrosion Science, 51, 2009.
  70. **Павловић Љ., Павловић М., Арсеновић В., Николић Н., Попов К., Павловић М. :** Утицај стања површине метала на сјај и структуру металних превлака, II део: морфологија и структура електрохемијски исталожених превлака метала, Заштита материјала, Вол. 48, број 4, 2007.
  71. **Panda S., Sarangi A., Panigrahi S.:** A new training strategy for neural network using shuffled frog-leaping algorithm and application to channel equalization, AEU - International Journal Of Electronics And Communications, 68(11), 2014.
  72. **Петровић Б.:** Испитивање механичких особина електролитичких превлака хрома, магистарска теза, ТМФ, Београд, 1993.
  73. **Петровић Б., Стојановић М., Попов К.:** Таложење хрома реверсном струјом уз константан однос катодног и анодног времена, 13. Југословенски симпозијум о електрохемији са међународним учешћем, Врњачка бања, 1995.
  74. **Петровић Б.:** Утицај параметара реверсне струје на таложење превлака хрома, докторска дисертација, ТМФ, Београд, 2000.
  75. **Петровић Б.:** Површинска заштита превлакама електролитичког хрома, Научно-техничка информација бр.17, ВТИ, Београд, 2000.
  76. **Петровић Б.:** Електролитичко таложење хрома из саморегулишућих електролита, Заштита материјала, вол.46, број 1, 2005.
  77. **Петровић Б.:** Електролитичко таложење хрома из саморегулишућих електролита, Заштита материјала, вол.46, број 1, 2005.

78. **Петровић Б., Стојановић М.:** Испитивање утицаја хромирања на отпорност према ерозионом деловању барутних гасова, Научно-технички преглед, Вол. 50, бр. 6, 2000.
79. **Роров К., Pavlović М., Pavlović Lj., Ćekerevac М., Remović G.:** "Electrode surface coarsening in pulsating over potential copper electrodeposition", Surf. Coat. Technol., 34, 1988.
80. **Popoola А., Fayomi О., Popoola О.:** Comparative Studies of Microstructural, Tribological and Corrosion Properties of Plated Zn and Zn-alloy Coatings, Int. J. Electrochem. Sci., 7, 2012.
81. **Поветкин В. В., Ковенская М. У.:** Структура электролитических покрытий, Металургия, Москва, 1989.
82. **Полишчук Ј:** Експертни системи, ЕТФ, Подгорица, 2004.
83. **Priddy К., Keller P.:** Artificial neural networks, Bellingham, Wash.: SPIE, 2005,
84. **Raeissi К., Saatchi А., Golozar М., Szpunar J.:** Effect of surface preparation on zinc electrodeposited texture, Surface & Coatings Technology 197, 2005.
85. **Расторгуев, Г. А.:** Особенности технологического наследования в машиностроительном производстве, Инженерный журнал, № 9, 2013.
86. **Расторгуев А. Г.:** Оптимальная последовательность операций механической обработки с учетом технологической наследственности, Вестник машиностроения, № 11, 2013.
87. **Rumelhart D. E., Hinton G., E., Williams R. J.:** Learning representations by back-propagating errors, Nature 23, 1986.
88. **Садовский В. Д.:** Структурная наследственность в стали, Металургия, Минск, 1993.
89. **Солодкова Л., Соловьева З.:** Электрохимия 4, 1987.
90. **Sriraman К., Strauss H., Brahimi S., Chromik S., Szpunar J., Osborne J., Yue S.** Tribological behavior of electrodeposited Zn, Zn-Ni, Cd and Cd-Ti coatings on low carbon steel substrates, Tribology International 56, 2012.
91. **Стојановић И.:** Утјецај технолошких параметара на заштитна својства водоразређивих премаза, дисертација, ФСБ, Загреб, 2011.
92. **Ступиншек М., Матијевић Б.:** Преглед поступака модифицирања и превлачења метала, Зборник радова: Топлинска обрадба метала и инжењерство површина, Хрватско друштво за топлинску обрадбу и инжењерство површина, Загреб, 2000.
93. **Ступиншек - Лисац Е.:** Корозија и заштита конструкцијских материјала, Свеучилиште у Загребу, Факултет кемијског инжењерства и технологије, Загреб, 2007.
94. **Сулов А. Г.:** Влияние технологического наследования на качество поверхностного слоя деталей машин, Машиностроение, № 1, 1999.
95. **Sully А., Brandis E.:** Chromium, Plenum Press, New York. 1987.

96. **Танасијевић С.:** Прилог истраживању утицаја услова формирања активних површина зуба на развој процеса хабања цилиндричних еволвентних зупчаника, докторска дисертација, Машински факултет, Крагујевац, 1980.
97. **Томић М., Павловић Љ., Павловић М., Станојевић Д., Глигорић М.:** Храпавост превлака сребра таложених галваностатским путем на алуминијум, Заштита материјала, Вол. 47, број 4, 2006.
98. **Томић М., Павловић М., Павловић Лј., Николић Н.:** Structural Characteristics Of Electrodeposited Copper Coatings, Journal of Engineering & Processing Management Vol. 1, №. 2, 2009.
99. **Tretheway R.:** Corrosion for Science and Engineering, Logman Group Ltd., UK, 18, 1988.
100. **Turley D.:** Erosion Of a Chromium-Plated Tank Gun Barrel, Wear, 131, 1989.
101. **Ture M., Kurt I., Turhankurum A., Ozdamar K.:** Comparing classification techniques for predicting essential hypertension. Expert Systems With Applications, 29(3), 2005.
102. **Fayomi O., Popoola A.:** An Investigation of the Properties of Zn Coated Mild Steel, Int. J. Electrochem. Sci., 7, 2012.
103. **Feng C., Wang X.:** Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression. IIE Transactions, 35(1), 2003.
104. **Haykin, S., Haykin, S.:** Neural networks and learning machines. New York: Prentice Hall/Pearson, 2009.
105. **Hendrix W., Meneve J., Vercammen K. .:** The ball crater test for determining the abrasive wear resistance of materials - some unexpected results, International research group on wear of engineering materials IRG-OECD Meeting, Amsterdam, 1999.
106. **Holmberg K., Laukkanen A., Ronkainen H., Wallin K., Varjus S., Koskinen J.:** Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface, Part I: Modeling stresses and strains, Surface and Coatings Technology 200, 2006.
107. **Cormick M., Dobson S.:** J. Appl. Electrochem., 17, 1987.
108. **Cote P., Rickard C.:** Gas-metal reaction products in the erosion of chromium-plated gun bores, Wear 241(1), 2000.
109. **Chandwani V., Agrawal V., Nagar R.:** Modeling slump of ready mix concrete using genetic algorithms assisted training of Artificial Neural Networks, Expert Systems With Applications, 42(2), 2015.
110. **Chang P., Wang Y., Tsai C.:** Evolving neural network for printed circuit board sales forecasting, Expert Systems With Applications, 29(1), 2005.
111. **Chang Y., Lin J., Shieh J., Abbod M.:** Optimization the Initial Weights of Artificial Neural Networks via Genetic Algorithm Applied to Hip Bone Fracture Prediction. Advances In Fuzzy Systems, 2012.

112. **Chojaczyk A., Teixeira A., Neves L., Cardoso J., Guedes Soares C.:** Review and application of Artificial Neural Networks models in reliability analysis of steel structures, *Structural Safety*, 52, 2015.
113. **Черкез Б., Богорад Я.:** Хромирование, Машиностроение, Москва, 1978.
114. **Џунић Д.:** Анализа процеса трења и хабања нанокompозита са металном основом, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015.
115. **Шауперл З.:** Утјецај тврдоће подлоге на трајност танких тврдиx превлака, докторска дисертација, ФСБ, Загреб, 2000.
116. **Шрејдер А.:** Теорија и практика електролитическог хромировања, Машиностроение, Москва, 1977.
117. ASTM D7187.
118. СОРС 1633.
119. СОРС 2325.
120. СОРС 2328.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

**"УТИЦАЈ ФАКТОРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ТЕХНОЛОШКЕ  
КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРЕВЛАКА КОД ПРОИЗВОДА НАМЕНСКЕ ИНДУСТРИЈЕ"**

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 10. 02. 2019. год.

Потпис аутора дисертације:



Мр Десимир Н. Јовановић



## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

***"УТИЦАЈ ФАКТОРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ТЕХНОЛОШКЕ***

***КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРЕВЛАКА КОД ПРОИЗВОДА НАМЕНСКЕ ИНДУСТРИЈЕ"***


Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 10.02.2019. год.

Потпис аутора дисертације:

  
Мр Десимир Н. Јовановић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И  
ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**


Наслов дисертације:

***"УТИЦАЈ ФАКТОРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ТЕХНОЛОШКЕ  
КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРЕВЛАКА КОД ПРОИЗВОДА НАМЕНСКЕ ИНДУСТРИЈЕ"***

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 10.02.2019. год.

Потпис аутора дисертације:

  
\_\_\_\_\_

Мр Десимир Н. Јовановић