

# Tvrde prevlake u zaštiti od trošenja alata za obradu tla

---

**Rašić, Pavle**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:623519>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



Sveučilište Josipa Jurja  
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet  
agrobiotehničkih  
znanosti Osijek**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical  
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of  
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Pavle Rašić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**TVRDE PREVLAKE U ZAŠTITI OD TROŠENJA ALATA ZA OBRADU TLA**

**Diplomski rad**

Osijek, 2023.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Pavle Rašić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**TVRDE PREVLAKE U ZAŠTITI OD TROŠENJA ALATA ZA OBRADU TLA**

**Diplomski rad**

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. prof. dr. sc. Goran Heffer, predsjednik
2. dr. sc. Ivan Vidaković, mentor
3. doc. dr. sc. Željko Barač, član

Osijek, 2023.

# SADRŽAJ

---

1. UVOD .....	1
2. PREGLED LITERATURE .....	2
2.1. Trošenje materijala .....	2
2.1.1. Abrazija .....	3
2.1.2. Adhezija .....	5
2.1.3. Umor površine .....	6
2.1.4. Tribokorozija .....	6
2.2. Trošenje alata za obradu tla .....	9
2.3. Zaštita od trošenja .....	12
2.4. Tribološke prevlake .....	14
2.5. Postupci oplemenjivanja površina materijala .....	18
2.5.1. Toplinska obrada materijala .....	23
2.5.2. Toplinsko-kemijska obrada materijala .....	25
2.5.3. Nataljivanje materijala .....	27
3. MATERIJAL I METODE .....	29
3.1. Uzorci za ispitivanje .....	29
3.1.1. Kaljeni uzorci .....	30
3.1.2. Nataljeni uzorci .....	30
3.1.3. Borirani uzrci .....	33
3.2. Uređaj za pokus trošenja .....	33
3.3. Abraziv u pokusu trošenja .....	35
3.4. Parametri pokusa trošenja .....	35
3.5. Utvrđivanje rezultata pokusa trošenja .....	36
4. REZULTATI .....	37
5. RASPRAVA .....	40
6. ZAKLJUČAK .....	42
7. POPIS LITERATURE .....	43
8. SAŽETAK .....	48
9. SUMMARY .....	49

10. POPIS TABLICA .....	50
11. POPIS SLIKA .....	51
12. POPIS GRAFIKONA .....	53
TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA	
BASIC DOCUMENTATION CARD	

## 1. UVOD

Trošenje materijala prisutno je u svim segmentima gospodarstva kod kojih se pojavljuju bilo kakvi mehanički sustavi čiji sastavni dijelovi su u međusobnom gibanju. Između dodirnih površina takvih dijelova pojavljuje se trenje, koje uzrokuje trošenje materijala od kojih su površine izrađene. Negativne posljedice trošenja, koje se očituju kroz značajne financijske gubitke, razlog su stalnim istraživanjima s ciljem boljeg razumijevanja navedenog problema i ostvarivanja mogućih ušteda primjenom različitih mjera zaštite od trošenja. Prema procjenama, takve uštede za industrijski razvijene zemlje mogu iznositi i do 1 % bruto nacionalnog dohotka (Ivušić, 1998.).

Istraživanjima trenja i trošenja materijala, te mjera zaštite od trošenja, bavi se znanstveno-stručna disciplina koja se zove tribologija. Značajan dio mjera zaštite od trošenja obuhvaćaju različite tehnologije koje poboljšavaju svojstva materijala u pogledu otpornosti trošenju.

Obrada tla zauzima jedno od najvažnijih mjesta u poljoprivrednoj proizvodnji, budući da bez odgovarajuće obrade tla nema niti dobrih prinosa u poljoprivredi. Poljoprivredna mehanizacija koja se koristi tijekom takve obrade obuhvaća brojna oruđa i alate, čiji su radni dijelovi izloženi različitim oblicima trošenja, a najznačajniji oblik je abrazijsko trošenje česticama tla. Navedenom obliku trošenja najviše su izloženi alati koji su tijekom rada u neposrednom dodiru s tlom – plugovi, podriivači, tanjurače, drljače, kultivatori itd.

Veličinu gubitaka materijala zbog abrazijskog trošenja česticama tla ilustrira podatak da su nepovratni gubitci materijala, utvrđeni mjerenjem mase novih i dotrajalih dijelova poljoprivredne mehanizacije, prosječno 26 % od početne mase proizvoda (Pintarić, 1988.).

Istraživanja navedenog slučaja trošenja, zbog specifičnih uvjeta eksploatacije, većinom su provedena u terenskim uvjetima, tijekom primjene određenih radnih dijelova alata (raonici, motičice, noževi, tanjuri i sl.) izloženih istome. Veći dio ovih istraživanja bavio se iznalaženjem mogućih metoda zaštite od trošenja kroz razvoj i primjenu različitih materijala radnih dijelova mehanizacije koji se odlikuju izraženijom otpornošću prema trošenju.

Među materijalima koji su otporni trošenju vrlo značajno mjesto zauzimaju tvrde prevlake, dobivene postupcima oplemenjivanja površina osnovnih vrsta materijala, uglavnom čelika različite kvalitete od kojih se izrađuju radni dijelovi alata za obradu tla.

Cilj ovog rada je objasniti što su tvrde prevlake, dobivene različitim postupcima, te istražiti mogućnosti njihove primjene u zaštiti od trošenja dijelova alata za obradu tla.

## 2. PREGLED LITERATURE

### 2.1. Trošenje materijala

Više autora su definirali trošenja kao progresivno oštećenje, koje uključuje gubitak materijala, a događa se na površini radnog dijela kao rezultat njegovog gibanja u odnosu na susjedne radne dijelove, pri čemu to gibanje može biti u obliku klizanja, kotrljanja ili udara (Jackson, 2020.; Purcek, 2020.).

Grilec i sur. (2015.) definiraju trošenje kao postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama.

Prema Ivušiću (1998.), procesi trošenja odvijaju se u okviru sustava koji se nazivaju tribosustavi, a označavaju sustave kod kojih postoji relativno gibanje među pojedinim dijelovima (elementima). Pri tome, postoje različiti oblici trošenja, a posljedica su raznih uvjeta prilikom dodira, tj. stanja površine, načina i brzine gibanja, temperature itd. Energetske i materijalne interakcije elemenata tribosustava opisuju mehanizmi trošenja.

Czichos (1978.) navodi da njemački standard DIN 50320, koji se bavi analizom sustava i klasifikacijom područja u procesu trošenja, definira četiri osnovna mehanizma trošenja:

- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija

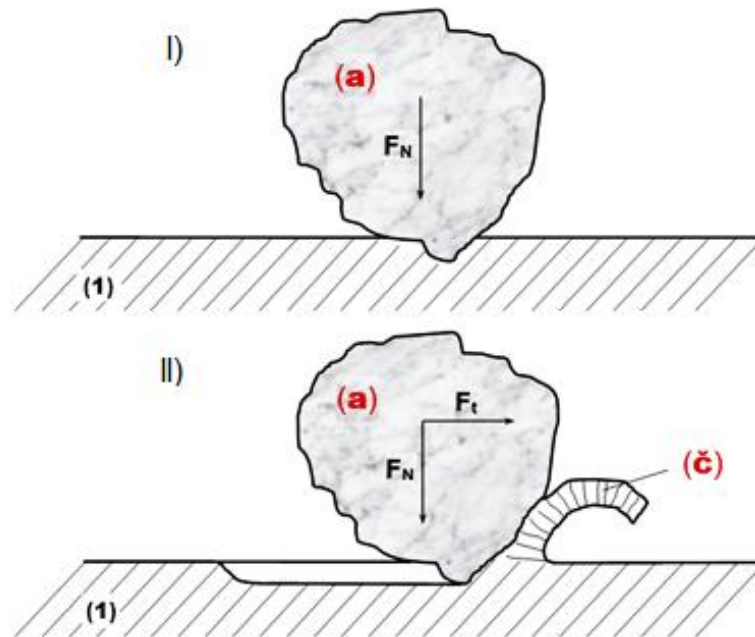
Klasifikacija različitih mehanizama trošenja obavlja se prema tipu relativnog gibanja između elemenata tribosustava. Iz područja trošenja materijala provedena su brojna istraživanja u kojima su praćeni i analizirani različiti slučajevi trošenja, a na temelju istih izvedene su i različite klasifikacije mehanizama trošenja, proizašle iz različitih tipova relativnog gibanja između elemenata tribosustava (klizanje, kotrljanje, osciliranje, udar i strujanje). No, većina autora provedenih istraživanja također je suglasna da se mogu definirati četiri osnovna mehanizma trošenja, sukladno onome što je definirao DIN 50320, koji u različitim slučajevima trošenja djeluju samostalno ili u kombinaciji više mehanizama (Heffer, 2002.).

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina (Ivušić, 1998.).

### 2.1.1. Abrazija

Prema Ivušiću (1998.), abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, prikazane slikom 1.:

- I) nastajanje pukotine, prodiranjem abrazivske čestice (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ ,
- II) napredovanje pukotine, istiskivanjem materijala (1) u obliku čestice trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .

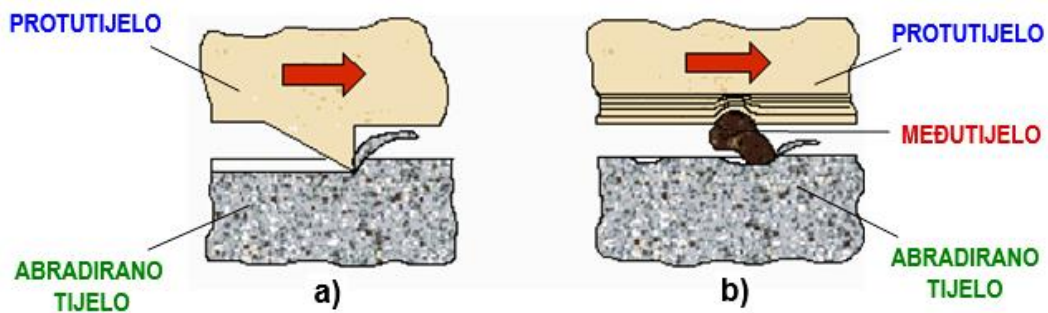


Slika 1. Jedinični događaj abrazije (Izvor: Heffer, 2002.)

Prema Grilecu i sur. (2015.), abraziju je moguće analizirati s nekoliko različitih gledišta:

1. Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija, mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazana slikom 2.:
  - a) Abrazija u dodiru dva tijela (*two-body abrasion*) – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazivno protutijelo);
  - b) Abrazija u dodiru tri tijela (*three-body abrasion*) – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

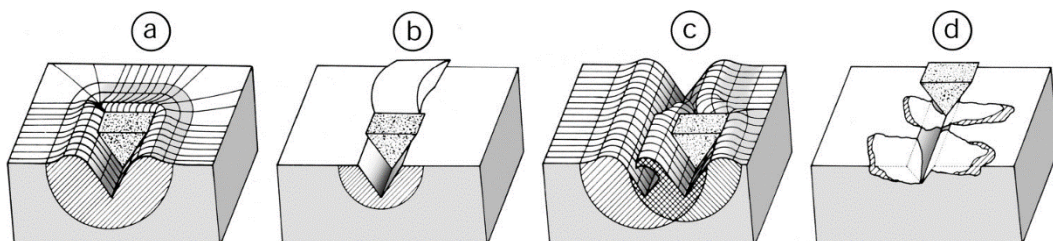




Slika 2. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i dodiru tri tijela (b) (Izvor: Heffer, 2002.)

Prema rezultatima iz više istraživanja, odnošenje materijala kod abrazije u dodiru tri tijela može biti značajno niže nego u slučaju abrazije u dodiru dva tijela. Razlog tomu je što slobodne abrazijske čestice samo oko 10 % vremena provode u dodiru s površinama između kojih se nalaze i tijekom kojega s njih odnose materijal, a oko 90 % vremena provode kotrljajući se u slobodnom međuprostoru (Grilec i sur., 2015.).

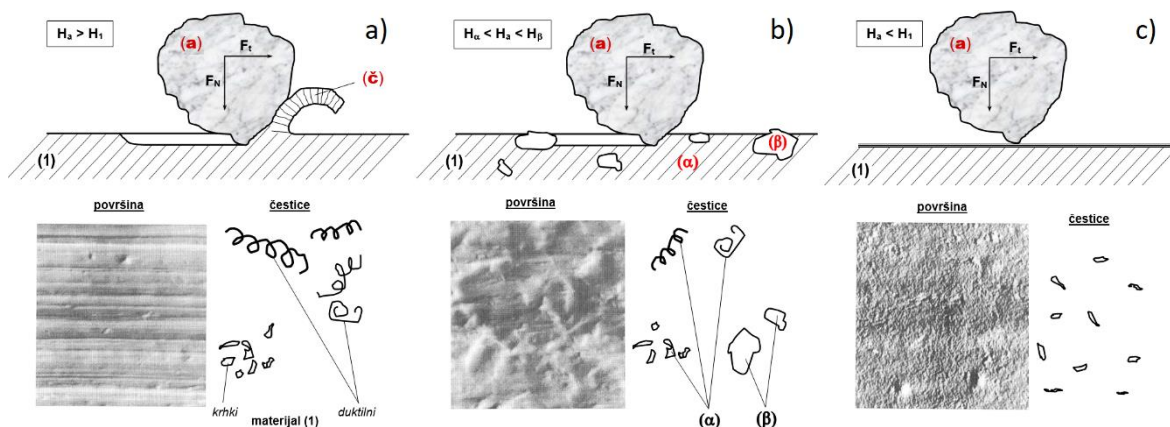
2. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine, abrazija se izražava u četiri oblika odnošenja materijala, prikazana slikom 3.:
  - a) Mikrobraždanje – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja (Slika 3.a);
  - b) Mikrorezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zarezana nastalog prolaskom abrazijske čestice (Slika 3.b);
  - c) Mikronaprnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina (Slika 3.c);
  - d) Mikroumor – odnošenje materijala mehanizmima umora površine koji su nastali učestalim izmjeničnim opterećenjem (Slika 3.d).



Slika 3. Shematski prikaz odnošenja materijala abrazijom (Izvor: Zum Gahr, 1987.)

3. Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala, mogu se pojaviti tri praktička slučaja:

- a) Čista abrazija – tvrdoća abraziva je veća od tvrdoće površine podloge. Površina izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine (Slika 4.a);
- b) Selektivna abrazija – u abradiranom materijalu postoji doza tvrđa od abraziva. Abraziv reže samo zahvaćeni sloj mekše faze (Slika 4.b);
- c) Nulta abrazija – cijela abradirana površina tvrđa od abrazivna. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja (Slika 4.c).

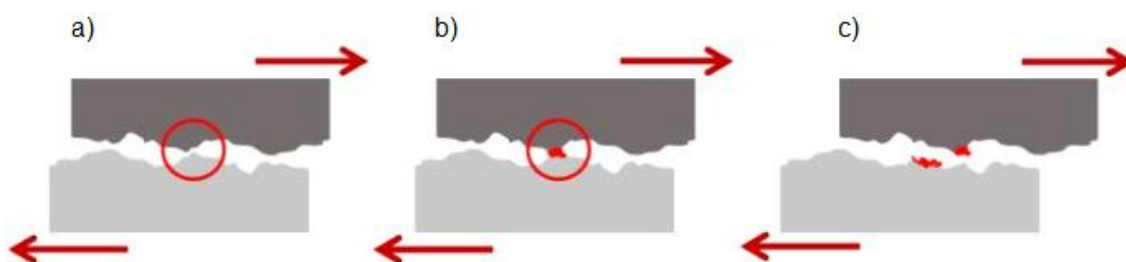


Slika 4. Slučajevi abrazije, ovisno o odnosu tvrdoća abraziva i materijala (Izvor: Heffer, 2002.)

### 2.1.2. Adhezija

Grilec i sur. (2015.) navode da adheziju karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze, prikazano na slici 5.:

- a) Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina;
- b) Plastično deformiranje adhezijskog spoja i mikrozavarivanje izbočina. Čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para;
- c) Otkidanje čestica. Oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast.

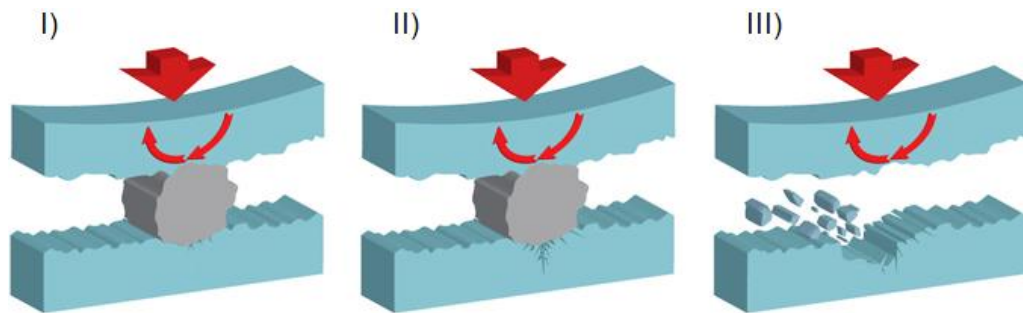


Slika 5. Jedinični događaj adhezije (Izvor: DGE - Smart Specialty Chemicals, 2020.)

### 2.1.3. Umor površine

Prema Ivušiću (1998.), umor površine je odvajanje čestica materijala s površine uslijed cikličkih promjena napreznja. Jedinični događaj umora površine odvija se u tri faze, prikazane slikom 6.:

- I) Stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine materijala;
- II) Napredovanje mikropukotine;
- III) Ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka.

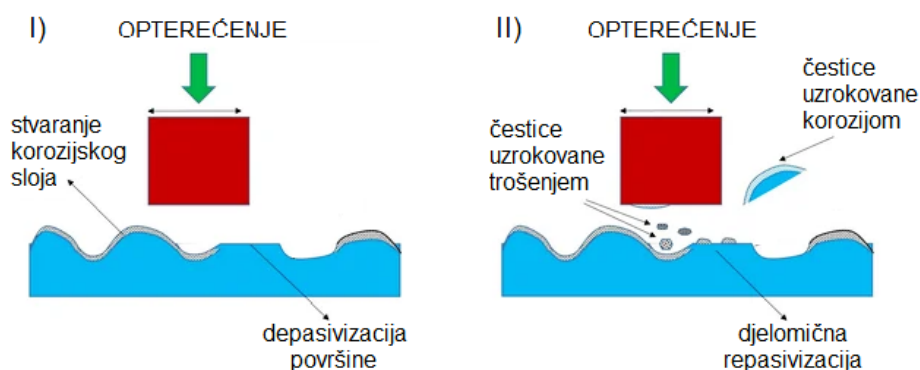


Slika 6. Jedinični događaj umora površine (Izvor: Pall Corporation, 2023.)

### 2.1.4. Tribokorozija

Ivušić (1998.) navodi da je tribokorozija ili tribokemijsko trošenje mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije opisuje se s dvije faze, prikazane na slici 7:

- I) Stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije;
- II) Mjestimično razaranje sloja produkata korozije.

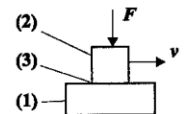
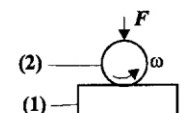
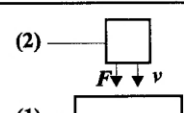
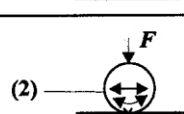
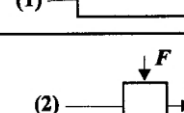
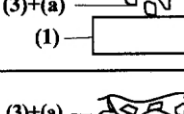
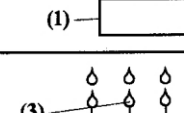
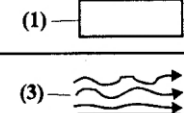


Slika 7. Jedinični slučaj tribokorozije (Izvor: Global Applications Team, 2021.)

Kada se govori o procesima trošenja, Grilec i sur. (2015.) ističu da se svaki proces trošenja sastoji od dva ili više mehanizama trošenja, koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu (jedan iza drugog), ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima.

Ivušić (1998.) ukazuje na to da se, prema vrsti elemenata tribosustava, vrsti dodira, te načinu i obliku relativnog gibanja, razlikuje 8 različitih slučajeva trošenja, prikazanih u tablici 1.:

Tablica 1. Podjela slučajeva trošenja (Izvor: Ivušić, 1998.)

	TIP TROŠENJA	HEMA TRIBOSUSTAVA <sup>1)</sup>	RELATIVNO GIBANJE	MEHANIZMI TROŠENJA <sup>2)</sup> / STUPANJ OPASNOSTI <sup>3)</sup>				POKAZATELJ OTPORNOSTI NA TROŠENJE
				AB	AD	UP	TK	
1.	SKLIZNO		sklizanje	4	1	3	5	Kompatibilnost materijala
2.	KOTRLJAJUĆE		kotrljanje	4	4	1	5	Dinamička izdržljivost površine
3.	UDARNO		udarci	3	3	1	5	
4.	IZJEDANJE (fretting)		vibracije				1	Konstruktivske mjere
5.	ABRAZIJA		sklizanje	1		4	5	Udio i mikrotvrdoća tvrde faze
6.	EROZIJA ČESTICAMA		strujanje	1		2	5	Udio i mikrotvrdoća tvrde faze/dinamička izdržljivost površine
7.	EROZIJA KAPLJEVINOM		strujanje			1	4	Dinamička izdržljivost površine
8.	KAVITACIJA		strujanje			1	4	

Oznake u tablici 1. predstavljaju:

1)

- (1) – funkcionalni dio
- (2) – funkcionalni dio
- (3) – međusredstvo (mazivo)
- (a) – abraziv

2)





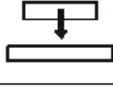




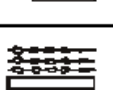
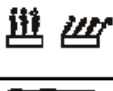





- AB – abrazija
- AD – adhezija
- UP – umor površine
- TK – tribokorozija

3)

- 1 – jako visoki
- 2 – visoki
- 3 – srednji
- 4 – niski
- 5 – najniži

Grilec i sur. (2015.) ukazuju na to da njemački standard DIN 50320 i smjernice VDI 3822 još detaljnije razrađuju vrste i mehanizme trošenja, kao što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50320 (Grilec i sur., 2015.)

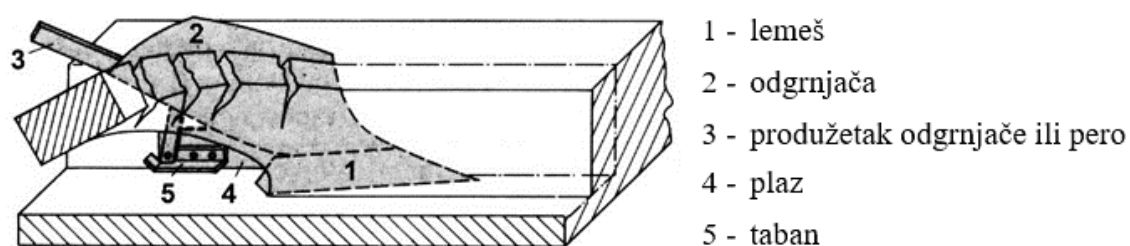
Struktura sustava	Tribološko naprezanje		Primjeri iz prakse	Vrsta trošenja	Mehanizam trošenja			
					Adhezija	Abrazija	Umor površine	Tribokorozija
Kruto tijelo - Medumedij (potpuno razdvajanje filma) - Kruto tijelo	Klizanje, Kotrljanje, Valjanje, Udaranje		Hidrodinamički podmazivani ležaji	-			●	○
Kruto tijelo - Kruto tijelo (kod suhog, graničnog i mješovitog trenja)	Klizanje		Vodilice, klizni ležaji, čahure, osovine (faza uhodavanja), kuglasti ventili	Klizno	●	○	○	●
	Kotrljanje, Valjanje		Valjkasti ležaji, igličasti ležaji, valjkasti ležaji, zupčanici, klizne površine bregaste osovine	Kotrljajuće, Valjno	○	○	●	○
	Vibriranje		Udarne opruge, sjedišta opruga, teleskopske opruge, uzbudne opruge	Trošenje vibriranjem (izjedanje - fretting)	●	●	●	●
	Udaranje		Igle ventila, ventili, udarno opterećeni graničnici	Udarano	○	○	●	○
Kruto tijelo - Čestice	Udaranje		Udarne ploče na transportnim uređajima	Abrazijsko-udarno		●	●	○
	Klizanje		Lopate bagera, svrdla za kamen, lopatice, gusjeničasti pogoni	Abrazijsko-klizno		●	●	○
Kruto tijelo - Kruto tijelo i čestice	Klizanje		Zaprjani ležaji i vodilice zbog neželjenih procesa	Abrazijsko-tri tijela	○	●	●	○
	Valjanje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi, puževi ekstrudera		○	●	●	○
	Udaranje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi		○	○	●	○
Kruto tijelo - Tekućina s česticama	Strujanje		Lopatice, pumpe, cjevovodi	Hidroabrazijsko		●	●	○
Kruto tijelo - Plin s česticama	Strujanje		Pneumatski transportni uređaji	Klizno trošenje mlazom čestica	○	●	●	○
	Strujanje, Udaranje		Uređaji za transport usitjenog ugljena, cementa i žitarica	Trošenje udarom mlaza	○	●	●	○
Kruto tijelo - Tekućina	Strujanje, Vibriranje		Pumpe, ventilatori, brodski vijci	Kavitacijska erozija			●	○
	Udaranje		Lopatice parnih turbina	Erozija udarom kapljica			●	○
	Strujanje		Pumpe, ventili, cjevovodi	Erozija tekućinom			○	●
Kruto tijelo - Plin	Strujanje		Ploče za toplinsku zaštitu u plinskim turbinama	Erozija plinom				●

## 2.2. Trošenje alata za obradu tla

Prema Zimmeru i sur. (1997.), poljoprivredna proizvodnja započinje kulturnom obradom tla kojom se površinski sloj priprema za odvijanje biološkog procesa razvoja uzgajanih biljaka. Pri tome, najznačajniju ulogu ima osnovna obrada tla koja definira i primarno uređuje dubinu sloja u kome će se razvijati korijen biljke.

U konvencionalnoj obradi tla glavno oruđe je plug, a osnovna obrada podrazumijeva okretanje – invertiranje, mrvljenje i rahljenje tla do ustaljene dubine obrade. Plužno tijelo, prodirući kroz tlo, djeluje poput klina, pri čemu tlo podiže, okreće, rahli i istovremeno premješta čestice tla uzduž pravca gibanja i u stranu (Zimmer i sur., 2014.).

Slika 8. prikazuje shemu prolaska plužnoga tijela kroz tlo.



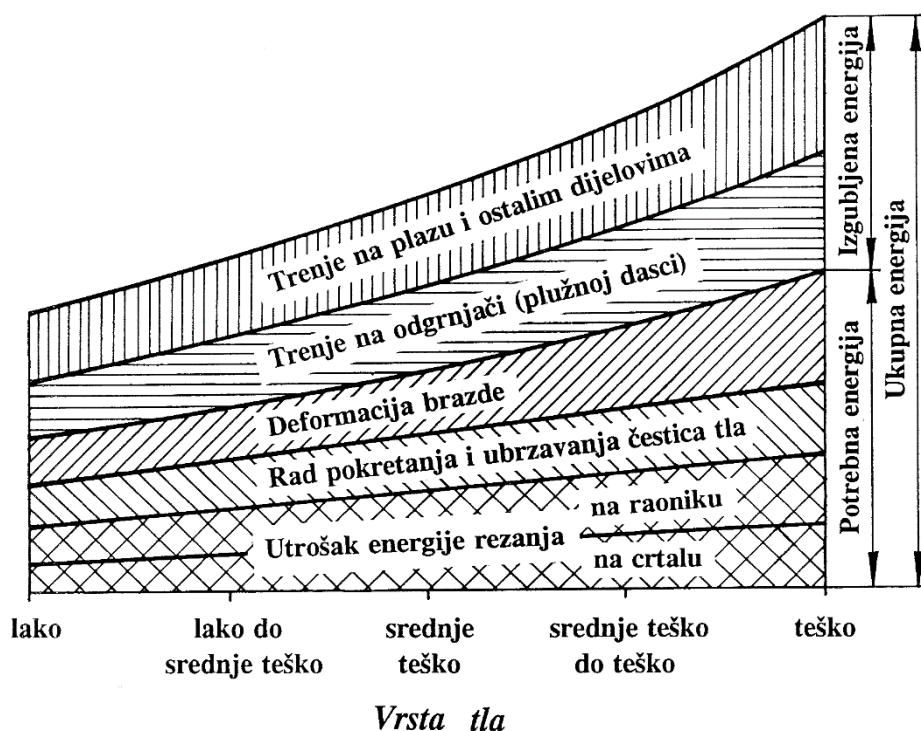
Slika 8. Shema prolaska plužnoga tijela kroz tlo (Izvor: Zimmer i sur., 2014.)

Osnovna obrada tla odvija se gibanjem alata koji je uronjen u tlo, određenom radnom brzinom koju omogućuje pogonski (vučni) stroj, pa se tijekom obrade u tlu pojavljuju otpori, za čije svladavanje treba određena energija. Takvi otpori posljedica su otpornosti tla prema zbijanju i sitnjenju, trenja tla po površini alata i unutrašnjeg trenja između čestica tla, kao i svojstava tla – vezanosti, ljepljivosti i plastičnosti (Heffer i sur., 1998.).

Kako navodi Fröba (1991.), smisao otpora u tlu najzornije je opisan kroz istraživanja Gorjačkina, koji kaže: „Tijelo koje se giba u nekoj okolini deformira istu, svladava otpor trenja i pomiče čestice okoline dajući im određenu brzinu“.

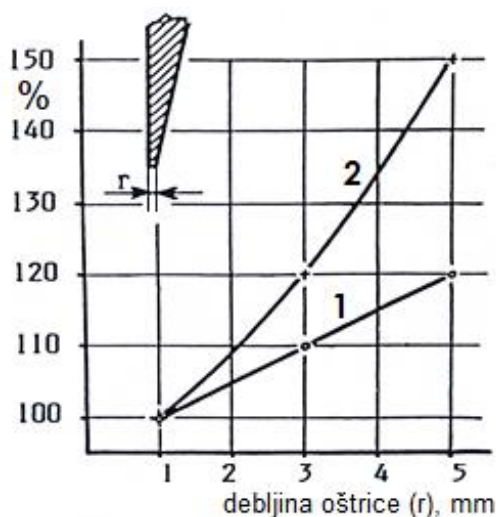
Više istraživanja je pokazalo da trenje tla po površini alata uzrokuje između 30 i 50 % ukupnih otpora pri obradi tla (Söhne, 1953.; Traulsen i Holz, 1982.; Vujčić i sur., 1984. itd.)

Traulsen i Holz (1982.) su analizirali energetske bilancu pogonskog stroja pri izvođenju oranja, te utvrdili da je energija koja se troši na svladavanje trenja tla po radnim površinama alata oko 45 % ukupne energije pri oranju, kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Energetska bilanca pogonskog stroja pri oranju (Izvor: Traulsen i Holz, 1982.)



Osim činjenice da trenje tla po površini alata u značajnoj mjeri određuje veličinu vučne sile, a time izravno i potrošnju goriva, ista pojava uzrokuje i trošenje radne površine alata, uslijed čega se mijenjaju oblik i dimenzije iste, kao što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Utjecaj debljine oštice lemeša na potrošnju goriva (1) i vučni otpor (2)  
(Izvor: Miloš i sur., 1993.)

Posljedice nastalih promjena su i slabija funkcionalnost obrade tla (manja dubina i širina oranja), veći troškovi obrade te smanjenje uroda poljoprivrednih kultura.

Ranije navedeni njemački standard DIN 50320 i smjernice VDI 3822 primjenjuju složenu klasifikaciju koja obuhvaća većinu poznatih oblika trošenja i razrađuje ih na način da utvrđuje razinu značajnosti pojedinih osnovnih mehanizama trošenja u ukupnom procesu trošenja. Na slici 11. prikazan je izvadak iz tablice cjelokupne razrade procesa trošenja, prema DIN 50320 i VDI 3822, koji je najbliži obliku trošenja alata za obradu tla.

Struktura sustava	Tribološko naprezanje		Primjeri iz prakse	Vrsta trošenja	Mehanizam trošenja			
					• uglavnom prevladava ○ manje značajno			
					Adhezija	Abrazija	Umor površine	Tribokorozija
Kruta tijelo - Čestice	Udaranje		Udarne ploče na transportnim uređajima	Abrazijsko-udarno		●	●	○
	Klizanje		Lopate bagera, svrdla za kamion, lopatice, gusjeničasni pogoni	Abrazijsko-klizno	ABRAZIJA		●	○

Slika 11. Razrada procesa trošenja krutog tijela česticama (Izvor: Grilec i sur. (2017.))

Iz prikazane slike vidi se da u trošenju krutog tijela česticama dominira mehanizam abrazije, a ukoliko su čestice krupnije i imaju naglašenije udarno djelovanje, može se pojaviti mehanizam umora površine. Budući da su čestice tla uglavnom vlažne, moguća je pojava i tribokorozija materijala, ali je njezin značaj u navedenom obliku trošenja puno manji.

Prema Hefferu i sur. (1998.), abraziv u procesu trošenja alata za obradu tla jest upravo tlo, u obliku mase čestica, koje predstavlja smjesu tvari različitih mehaničkih i abrazijskih svojstava. Glavni abrazijski element u tlu su čestice kvarca te druge modifikacije silicijevog dioksida. Ostali abrazijski elementi su različiti metalni oksidi koji se mogu naći u sastavu tla – oksidi kalcija, željeza, aluminija itd. Tijekom eksploatacije površina alata za obradu tla izložena je procesu trošenja uslijed klizanja, udara i tlaka čestica tla, te se stoga osim abrazije (a) mogu pojaviti umor površine (b) i tribokorozija (c), kao u primjeru trošenja na slici 12.



Slika 12. Tragovi trošenja alata za obradu tla (Izvor: Ausec, 2017.)



### 2.3. Zaštita od trošenja

LZMK (2018.) navodi da tribološke mjere zaštite od trošenja obuhvaćaju: izbor materijala triboelemenata, zaštitu površina od trošenja, uhodavanje (početno trošenje) i podmazivanje.

Uhodavanje je kompleksni fenomen povezan s teksturom površine, geometrijom, formiranjem površinskog filma, kemijskim i fizikalnim svojstvima materijala u kontaktu, mazivu i aditivima, uvjetima rada itd., te još uvijek nije dobro objašnjeno. Brojna su opisi pojma „uhodavanje“, na temelju kojih se može zaključiti da uhodavanje podrazumjeva pojave koje se javljaju u početnoj fazi rada tribosustava, kao i mjere koje se poduzimaju u početnoj fazi rada, kako bi se produljio radni vijek tribosustava (Grilec i sur., 2015.)

Hrvatska enciklopedija (LZMK, 2021.) navodi da je podmazivanje primjena maziva za smanjivanje trenja među površinama koje se dodiruju, a gibaju se jedna u odnosu na drugu (tarne površine). Osim smanjenja trenja i njegovih štetnih posljedica (razvijanje topline, trošenje tarnih površina i gubitak energije), njime se odvođe toplina i čestice nastale trošenjem materijala, a sprječava se i dovođenje stranih čestica među tarne površine njihovim brtvljenjem.

Uhodavanje i podmazivanje su vrlo bitne tribološke mjere, koje većinom pripadaju području održavanja cjelokupnih tehničkih sustava, dok se pri kreiranju pojedinih tribosustava većina triboloških mjera usmjerava na izbor materijala triboelemenata i zaštitu površina od trošenja.

Jelaska (2005) navodi da je izbor odgovarajućih materijala za izradu dijelova strojeva važna i odgovorna zadaća konstruktora, te da je tijesno povezana s funkcionalnošću i radnom sposobnošću dijelova strojeva u različitim sklopovima. Izbor materijala je ovisan o svojstvima materijala, kao što su statička i dinamička čvrstoća, površinska tvrdoća, otpornost trošenju i koroziji, svojstva trenja itd., te u velikoj mjeri utječe na postupak i ekonomičnost izrade. Za što jednostavniju izradu i obradu, materijal mora imati dobru mehaničku obradivost, zavarljivost, livnost, kovnost itd., te mora biti pogodan za toplinsku obradu. Za izradu strojnih dijelova najčešće se upotrebljavaju sljedeći materijali: čelik, čelični lijev, sivi lijev, legirani obojeni metali i legirani laki metali, a ponekad i polimerni materijali, keramika, drvo, tekstil itd. Najčešće upotrebljavani materijal je čelik, koji u najvećoj mjeri zadovoljava potrebe visoke volumenske i površinske čvrstoće, temperaturne postojanosti, žilavosti itd. Na svojstva čelika u velikoj mjeri utječe se različitim postupcima izrade i obrade, dodatkom legiranih elemenata i odgovarajućom kemijskom i toplinskom obradom.

Zaštita dijelova izloženih trošenju provodi se izborom materijala koji ima izraženo svojstvo otpornosti na određeni mehanizam trošenja. Budući da je abrazija mehanizam trošenja koji se u tribosustavima javlja vrlo često, prema istraživanjima u oko 50 % slučajeva (Czichos, 1978.), izbor materijala se obavlja prema uputama prikazanim u tablici 3.

Tablica 3. Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije (Izvor: Ivušić, 1998.)

Radni uvjeti	Zahtijevana svojstva	Materijal
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visoka naprezanja</li> <li>▪ udarci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visoka žilavost</li> <li>▪ otvrdnjavanje hladnom deformacijom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ austenitni manganski čelik</li> <li>▪ guma</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ niska naprezanja</li> <li>▪ sklizanje</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. visoka tvrdoća</li> <li>2. žilavost manje važna</li> <li>3. brza izmjena dijelova</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ kaljeni ili drugačije otvrdnuti metalni materijali</li> <li>▪ navareni slojevi</li> <li>▪ keramika</li> </ul>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. niska cijena osnovnog materijala</li> <li>2. trajanje izmjene manje važno</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ keramika</li> <li>▪ kamene pločice</li> <li>▪ beton</li> </ul>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. najveća otpornost na trošenje</li> <li>2. cijena nevažna</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ volframov karbid (tvrđi metal)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visoka naprezanja</li> <li>▪ jaki udarci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visoka žilavost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ljevovi i čelici</li> <li>▪ zavareni slojevi</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ vlaga i korozija</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ otpornost na koroziju</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ korozijski postojani čelici</li> <li>▪ keramika</li> <li>▪ guma</li> <li>▪ polimeri</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ niska naprezanja</li> <li>▪ sitne čestice</li> <li>▪ slaba abrazivnost čestica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ niski koeficijent trenja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ poliuretan</li> <li>▪ teflon</li> <li>▪ glatke metalne površine</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ visoka temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ otpornost lomu i toplinskim šokovima</li> <li>▪ opća otpornost pri povišenim temperaturama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ljevovi i čelici legirani kromom</li> <li>▪ neke keramike</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ minimalno trajanje zastoja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ laka izmjena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bilo koji materijal koji se lako pričvršćuje ili nanosi</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ zakrivljene i nepravilne površine i oblici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bilo koje ili kombinacije gornjih svojstava</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ navareni slojevi</li> <li>▪ materijali koji se nanose lopaticom</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ jako teški rad pri visokim temperaturama</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ navareni slojevi</li> </ul>

Brojna provedena tribološka istraživanja pokazala su da je najznačajnije svojstvo u definiranju materijala otpornih abrazijskom trošenju njihova tvrdoća, pa su u tablici 4. naznačeni podaci o tvrdoći određenog broja tehničkih materijala, koji se u različitim oblicima mogu naći u praktičnoj primjeni.

Tablica 4. Tvrdoće tehničkih materijala (Heffer, 2002.)

Material	Tvrdoća (HV)	Napomena
Dijamant	7000	industrijski dijamant
Borov nitrid (BN)	4500	BN – kubična kristalna rešetka
Rubin	4000	sinterirani
Oksidni tvrdi materijali	1600 do 4000	rezná keramika
Titanov karbid (TiC)	3600	
Korund (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3000	sinterirani
Ti i Al-nitrid (TiAl)N	2800	
Widia – sinterirana	1400 do 2500	karbidni tvrdi materijal
Silicijev karbid (SiC)	2400	
Widia – lijevana	1800 do 2300	»Stellit«
Nitirani čelik	1200	
Kaljani čelik	1000	
Mekani čelik	90	

#### 2.4. Tribološke prevlake

Pod pojmom „tribološke prevlake“ podrazumijeva se velika skupina materijala oplemenjenih (modificiranih) površina, prilagođenih za primjenu u različitim tribološkim uvjetima s jedinstvenim ciljem – povećanjem vijeka trajanja proizvoda čije radne površine su tijekom eksploatacije izložene pojačanim procesima trenja i trošenja. Ne manje značajni su pritom i efekti povoljnijih režima rada, primjene jeftinijih osnovnih materijala, ekološkog očuvanja okoliša itd. (Heffer, 2002.).

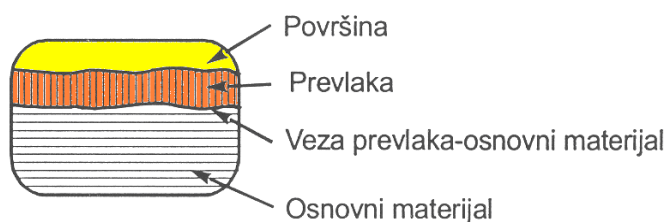
Područje koje se bavi tribološkim prevlakama poznato je pod nazivom „Inženjerstvo površina“ i danas se smatra najaktivnijim područjem tribološkog djelovanja (Ivušić, 1998.).

Jedna od definicija kaže da „Inženjerstvo površina sadržava primjenu tradicionalnih i inovativnih površinskih tehnologija u cilju „konstruiranja“ sustava „površinski sloj-osnovni materijal“, kao materijala sa svojstvima koja ne može dati niti sam osnovni materijal niti

sam površinski sloj, a ta svojstva moraju jamčiti dobre eksploatacijske karakteristika uz prihvatljive proizvodne troškove“ (HDMT, 1993.).

Jakovljević (2007.) navodi da je Inženjerstvo površina disciplina unutar koje su nastali i razvijaju se postupci površinske obrade kojima se postižu kombinacije svojstava površinskog sloja i osnovnog materijala, kakva se ne mogu postići upotrebom bilo kojega jednorodnog materijala.

Iz navedenih definicija je vidljivo da je za ostvarivanje kvalitetne tribološke prevlake mjerodavan sustav „prevlaka-osnovni materijal“, u okviru kojega se mogu definirati četiri područja, prikazana slikom 13.



Slika 13. Područja u sustavu „prevlaka-osnovni materijal“ (Izvor: Schauperl, 2000.)

Svako od prikazanih područja svojim svojstvima značajno utječe na procese trenja i trošenja u okviru određenog područja primjene, što se vidi iz tablice 5.

Tablica 5. Utjecajna svojstva područja u sustavu „prevlaka-osnovni materijal“ (Izvor: Schauperl, 2000.)

Područje	Utjecajna svojstva
površina	hrapavost, kemijska postojanost
prevlaka	tvrdoća, žilavost, modul elastičnosti, toplinska stabilnost, toplinska vodljivost
veza prevlaka-osnovni materijal	adhezija, smična čvrstoća
osnovni materijal	koeficijent toplinske dilatacije, modul elastičnosti, žilavost, tvrdoća, toplinska vodljivost

Hogmark i Hedenquist (1994.) ističu da idealna tribološka prevlaka općenito treba ispuniti slijedeće zahtjeve:

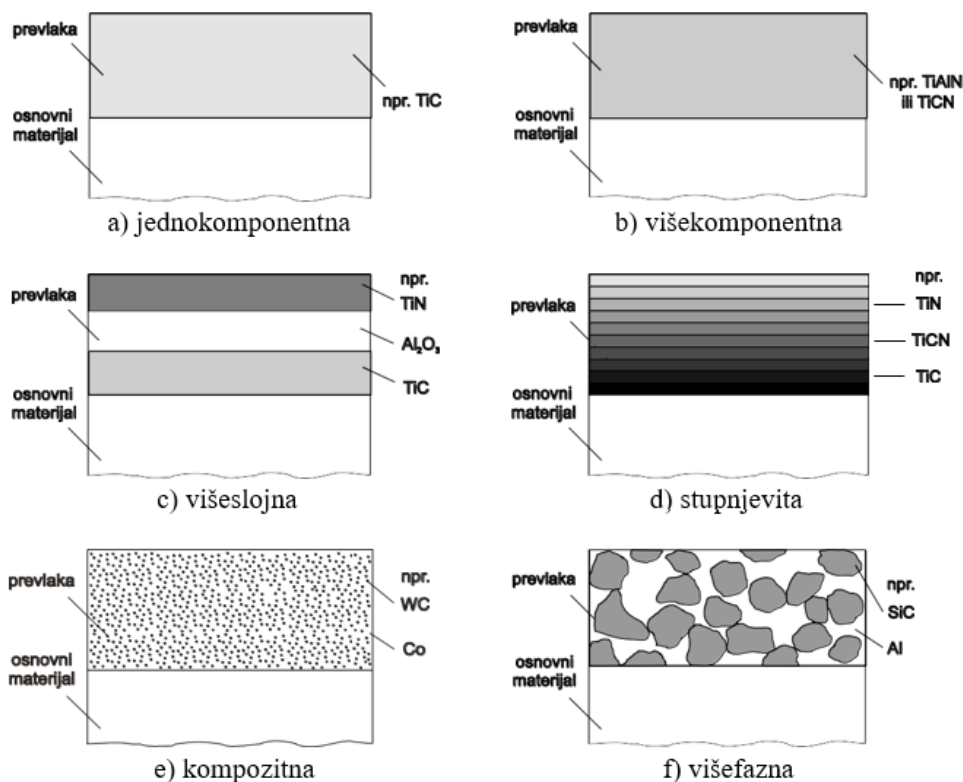
- zadovoljavajuću tvrdoću zbog otpornosti na abraziju,
- zadovoljavajuću žilavost zbog sprječavanja odvajanja od podloge,
- dobru prionjivost (adheziju) na podlogu,
- dobru kemijsku postojanost,

- aktivnost pri stvaranju tribološkog filma na površini prevlake,
- postupnu prilagodljivost podlozi.

Osim toga, autori ističu da je, za ostvarivanje optimalne prevlake u području određene primjene, potrebno postaviti i dodatne zahtjeve koji su specifični za isto područje.

**Prema sastavu i obliku**, prevlake se općenito mogu podijeliti na šest vrsta, shematski prikazanih slikom 14. (Subramaniani i Strafford, 1993.):

- Jednokomponentne prevlake – cijela prevlaka se sastoji od jedne komponente koja je najčešće karbid, nitrid, borid, oksid ili ugljik u obliku dijamanta;
- Višekomponentne prevlake – dodavanjem drugog metala jednokomponentnim prevlakama stvaraju se višekomponentni slojevi;
- Višeslojne prevlake – prevlake koje se sastoje od više različitih slojeva s jasnom granicom između njih;
- Stupnjevite prevlake – višeslojne prevlake bez jasne granice između slojeva, pri čemu se sastav sloja postupno mijenja;
- Kompozitne prevlake – u pravilu prevlake od metalne matice ojačane nemetalnim česticama ili kratkim vlaknima;
- Višefazne prevlake – prevlake sastavljene iz više faza jednoliko zastupljenih i raspoređenih u prevlaci.



Slika 14. Podjela prevlaka prema sastavu i obliku (Izvor: Subramaniani i Strafford, 1993.)

**Prema tvrdoći**, tribološke prevlake mogu se podijeliti se na mekane i tvrde (Holmberg i Matthews, 2009.):

- Mekane tribološke prevlake namijenjene su za smanjenje trenje klizanja, što se postiže njihovim nanošenjem na tvrdi podlogu. Najveći problem mekih prevlaka je slaba otpornost na trošenje i kratak vijek trajanja. No, u današnje vrijeme na to se može utjecati promjenom vanjskih uvjeta, kao što su: brzine klizanja, opterećenje, hrapavost sloja, materijal koji kliže po sloju, kao i tehnologija izrade sloja.

Prema vrsti materijala, mekane prevlake mogu se podijeliti na:

- Polimerne prevlake – na bazi politetrafluoretilena (PTFE), poliimida (PI) i elastomera;
  - Prevlake od mekih metala – na bazi olova (Pb), srebra (Ag), zlata (Au), bakra (Cu), nikla (Ni), indija (In), kroma (Cr), kadmija (Cd) itd.;
  - Prevlake od lamelarnih krutina – na bazi molibden disulfata ( $\text{MoS}_2$ ) i grafita.
- Tanka tvrda prevlaka na mekšoj, žilavoj podlozi pokazala se tribološki vrlo korisnom kombinacijom materijala. Tvrđi sloj na mekšoj podlozi pružit će poboljšanu zaštitu od grebanja tvrdim površinama ili krhotinama (česticama). Tvrde prevlake su stoga posebno korisne u primjenama koje uključuju abrazijsko ili erozijsko trošenje.

Prema vrsti materijala, tvrde prevlake mogu se podijeliti na:

- Nitridne prevlake – na bazi TiN, (TiAl)N, BN, CrN, CN, VN, HfN, ZrN itd.;
- Karbidne prevlake – na bazi TiC, SiC,  $\text{B}_4\text{C}$ , WC, CrC, VC, TaC;
- Oksidne prevlake – na bazi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- Boridne prevlake – na bazi  $\text{TiB}_2$ , FeB;
- Tvrde ugljične prevlake – na bazi dijamanta i diamond like carbon-a (DLC).

Oplemenjivanje površina najvažniji je način usklađivanja često proturječnih zahtjeva na materijal elemenata izloženih trošenju. Osnovni materijal ispunjava zahtjeve u pogledu tehnoločnosti i cjelovitosti elemenata, a prevlaka ispunjava tribološke zahtjeve. No, i izbor same prevlake, odnosno postupka oplemenjivanja površine s ciljem dobivanja prevlake, predstavlja kompromis između niza tehnoloških i ekonomskih zahtjeva u pogledu vrste i svojstava prevlake, koja su često također proturječna, budući da zahtijevaju npr. visoku tvrdoću uz istovremeno visoku žilavost prevlake, itd. U iznalaženju optimalnih mogućnosti oplemenjivanja površina razvijeni su brojni postupci, čiji izbor ovisi o specifičnostima primjene, zahtjevima na prevlaku i mogućnostima provedbe postupka (Ivušić, 1998.).

## 2.5. Postupci oplemenjivanja površina materijala

Jedna od podjela postupaka oplemenjivanja površina, kojima se modificiraju i prevlače površine materijala, definirana prema vrsti prevlake, prikazana je tablicom 6.

Tablica 6. Postupci oplemenjivanja površina (Izvor: Ivušić, 1998.)

<b>I VRSTA</b> Nanošenje druge vrste materijala		<b>II VRSTA</b> Promjena sastava na površini	<b>III VRSTA</b> Promjena mikrostrukture na površini
A. <u>Navarivanje</u> A1 Plinsko A2 Elektrolučno A3 Plazmom	E. <u>Elektrotaloženje</u> E1 Elektroliza E2 Metalizacija E3 Anodizacija E4 Elektroforeza	H. <u>Intersticijsko otvrdnuće</u> H1 Cementiranje H2 Nitiranje H3 Karbonitriranje H4 Sulfonitriranje H5 Boriranje	K. <u>Mehanička obrada</u> K1 Sačmarenje K2 Valjanje K3 Strojna obradba
B. <u>Naštrcavanje</u> B1 Plamenom B2 Električnim lukom B3 Plazmom B4 Eksplozijom	F. <u>Taloženje iz parne faze</u> F1 Fizikalno (PVD) F2 Kemijsko (CVD)	I. <u>Difuzijska obrada</u> I1 Siliciranje I2 Aluminiziranje I3 Kromiranje I4 Vanadiranje	L. <u>Toplinska obrada</u> L1 Plameno kaljenje L2 Indukcijsko kaljenje L3 Kokilno lijevanje
C. <u>Platiranje – oblaganje</u> C1 Lemljenjem C2 Eksplozivnim spajanjem C3 Difuzijskim spajanjem	G. <u>Kemijsko taloženje</u> G1 Kemijsko platiranje G2 Fosfatiranje G3 Kromiranje	J. <u>Kemijska obrada</u> J1 Nagrizanje J2 Oksidiranje	M. <u>Termomehanička obrada</u> M1 Martensitno deformacijsko otvrdnjavanje
D. <u>Mješovito</u> D1 Otvrdnjavanje iskrenjem D2 Prevlačenje praškom D3 Organske prevlake D4 Bojanje D5 Vruće uranjanje			

HDMT (1993.) navodi da se, prema tehnologiji izvođenja, postupci oplemenjivanja površina mogu podijeliti u slijedeće skupine:

- I) Toplinsko-kemijski postupci (tradicionalni):
- Cementiranje – pougljičavanje + kaljenje,

- Karbonitriranje – s kaljenjem ili bez kaljenja,
  - Nitiranje,
  - Nitrokarburiranje,
  - Boriranje;
- II) Postupci u ioniziranom plinu (plazma):
- Nitiranje u plazmi,
  - Pougličavanje u plazmi,
  - Raspršivanje lukom plazme (*Plasma Arc Spraying*);
- III) Postupci taloženja iz parne faze:
- Kemijsko taloženje iz parne faze (CVD-postupak),
  - Fizikalno taloženje iz parne faze (PVD-postupak);
- IV) Galvanski postupci nanošenja (elektrolitski):
- Niklanje,
  - Tvrdo kromiranje,
  - Fosfatiranje,
  - Alitiranje;
- V) Postupak dobivanja karbidnih slojeva u solnoj ili fluidiziranoj kupki:
- TD-postupak (*Toyota Diffusion Process*);
- VI) Kratkotrajni postupci visoke gustoće energije:
- Plameno kaljenje,
  - Indukcijsko kaljenje,
  - Impulsno kaljenje,
  - Visokofrekventno otporno kaljenje,
  - LASER-ski postupci modifikacije površinskih slojeva – kaljenje, rastaljivanje, spajanje i homogeniziranje prethodno nanesenih slojeva,
  - Elektronski snop – isti postupci kao kod LASER-a.

Najčešće primjenjivani su tradicionalni toplinsko-kemijski (termodifuzijski) postupci i to uglavnom u dodatnom oplemenjivanju površina različitih alata. Oni se primjenjuju već dosta dugo, u različitim varijantama postupaka i vrsta slojeva (HDMT, 1993.).

Na temelju tradicionalnog procesa difuzije razvijeni su i postupci difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva, koji se sastoje od karbida jakih karbidotvornih elemenata (V, Nb, Cr, W, Ti, ...), čija tvrdoća se kreće u području od 2000 do 3500 HV, te su stoga vrlo prikladni za primjenu u sustavima koji su izloženi trošenju. Izrazito su otporni na mehanizme abrazije,

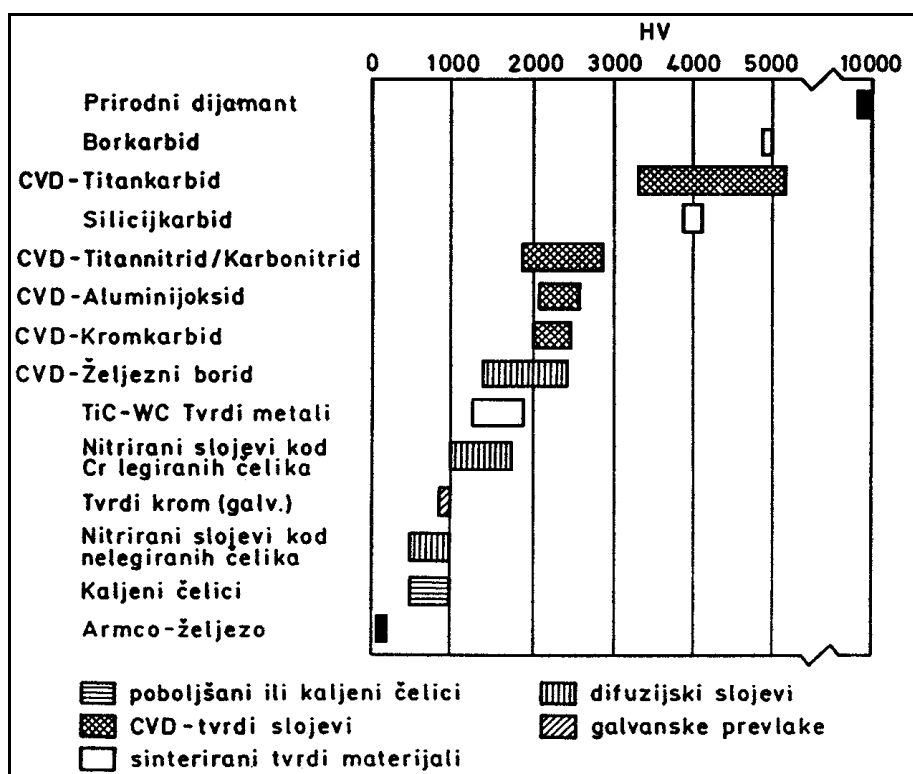


adhezije i tribokorozije, no pri mehanizmu umora površine imaju nisku otpornost zbog svoje krhkosti, te se u uvjetima takvog trošenja ne preporučuju (Stupnišek i Matijević, 1998.).

Schauperl (2000.) navodi da je postupke nanošenja triboloških prevlaka na osnovni materijal općenito moguće podijeliti na četiri osnovna oblika:

- iz parne faze – napanje (*gaseous state processes*),
- iz otopina (*solution state processes*),
- iz tekuće ili polutekuće faze (*molten or semi molten state processes*),
- iz krute faze (*solid state processes*).

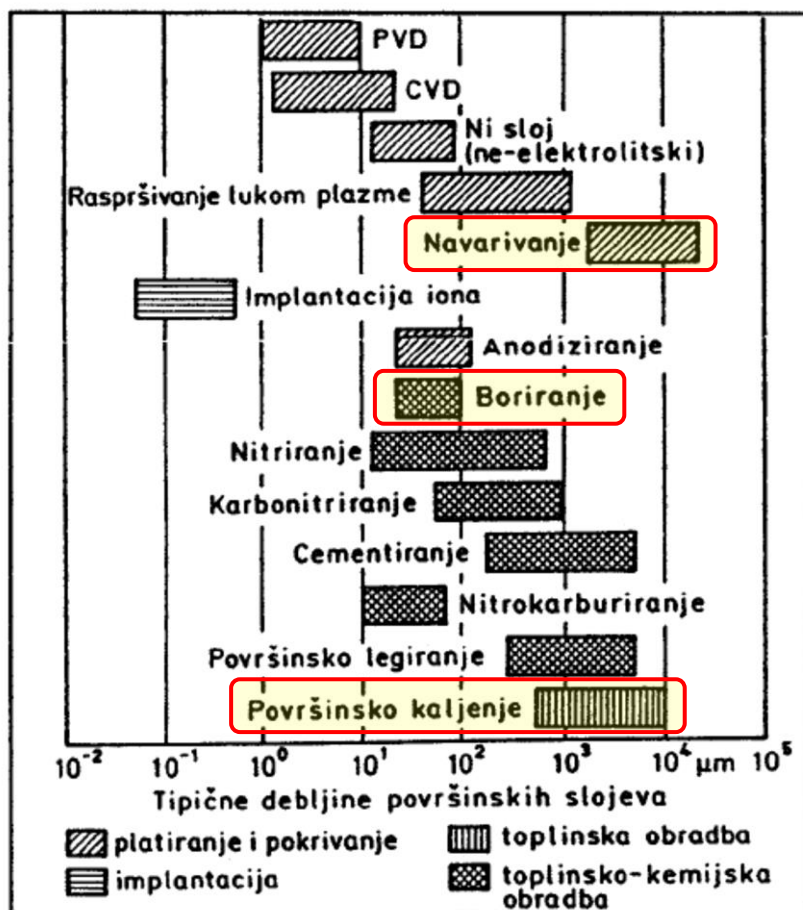
U tribološkoj primjeni vrlo bitni zahtjevi na prevlake su tvrdoća i debljina (dubina) površinskog sloja. Tvrdoća je često najvažnije mjerilo otpornosti na trošenje određenog materijala, budući da tvrdi i kruti površinski sloj može podnijeti veće naprezanje i akumulirati više deformacije, nastalih tijekom procesa trošenja (Filetin i Kovačiček, 1993.). Slika 15. prikazuje orijentacijske vrijednosti tvrdoće najčešće primjenjivanih površinskih slojeva i postupci njihovog dobivanja.



Slika 15. Orijentacijske vrijednosti tvrdoća površinskih slojeva (Filetin i Kovačiček, 1993.)

Debljina (dubina) sloja značajna je u smislu prijenosa naprezanja, nastalih uslijed opterećenja u tribološkim procesima, sa površine u strukturu prevlake. Ukoliko je prevlaka tanka, naprezanje se prenosi kroz nju na osnovni, uglavnom mekši materijal, čija deformacija

može izazvati i deformaciju prevlake, te ponekad i njezino pucanje. Pri većoj debljini prevlake naprezanje se zadržava u strukturi same prevlake, koja ga podnosi zbog svojih triboloških svojstava (Filetin i Kovačiček, 1993.). Slika 16. prikazuje pregled ostvarivih debljina (dubina) površinskih slojeva i postupaka njihovog dobivanja.

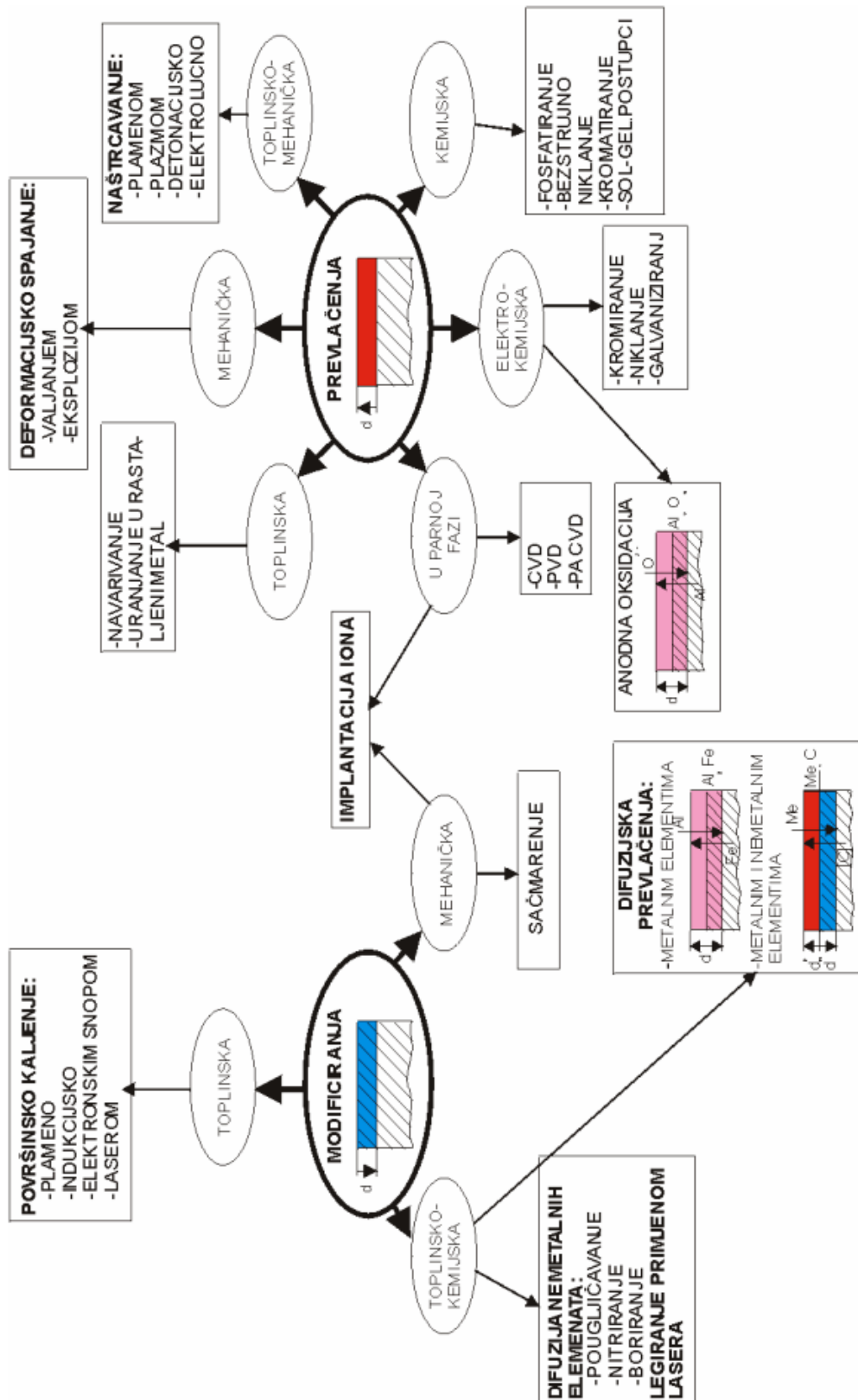


Slika 16. Debljine površinskih slojeva otpornih trošenju (Izvor: Filetin i Kovačiček, 1993.)

U crveno uokvirenim poljima prikazani su postupci toplinske i toplinsko-kemijske obrade, te navarivanja, za dobivanje tvrdih prevlaka s povećanom otpornošću abrazivskom trošenju. U okviru istih su i postupci koji se žele istražiti u ovom radu, kako bi se utvrdila mogućnost njihove primjene u zaštiti od trošenja česticama tla. Stoga su u daljnjem dijelu rada opisani samo postupci kojima su obrađeni uzorci za istraživanje koje je tema ovog diplomskog rada.

Prema Stupnišek i Matijeviću (2000.), u industrijski razvijenim zemljama tehnologije površina označavaju se kao ključne tehnologije, jer o njihovoj primjeni uvelike ovisi kvaliteta proizvoda. Stoga se primjenom postupaka modificiranja i prevlačenja postižu višestruka povećanja trajnosti metalnih strojnih dijelova i alata, a što pridonosi značajnom povećanju kvalitete proizvoda i ekonomičnosti proizvodnje. Uvažavajući temeljne fizikalne

i kemijske zakonitosti tehnoloških procesa, autori su opisali osnovnu podjelu i klasifikaciju postupaka obrade površina, prikazanu slikom 17.



Slika 17. Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina

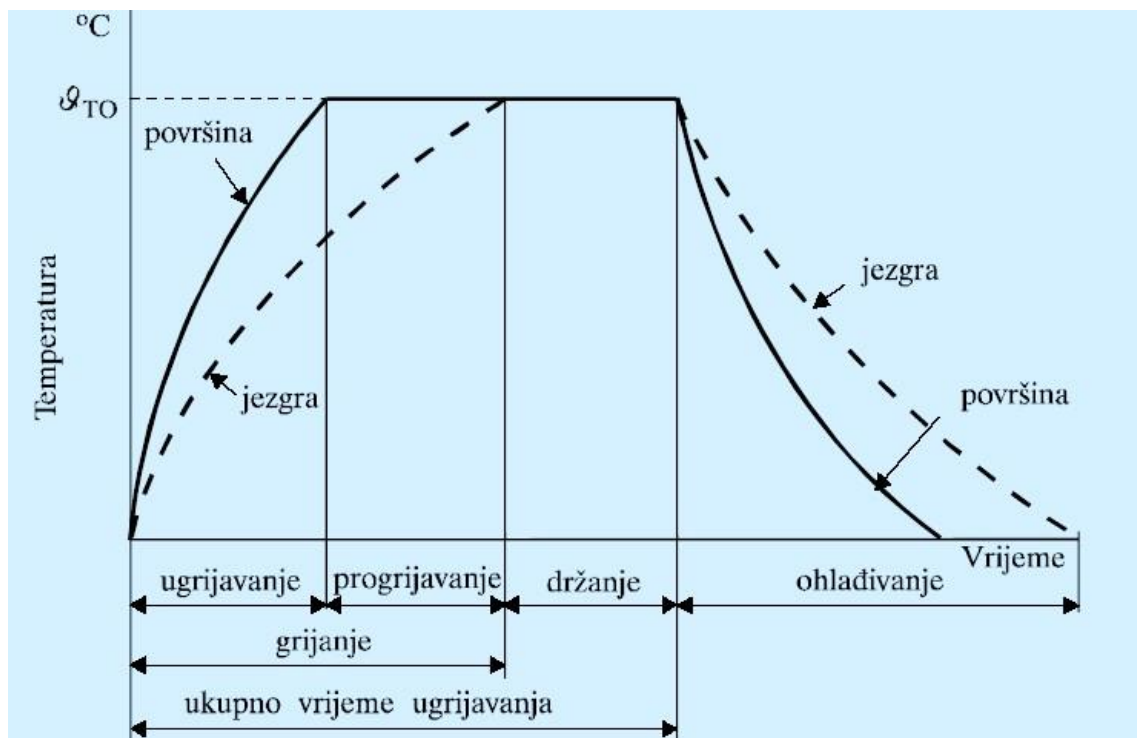
(Izvor: Stupnišek i Matijević, 2000.)

### 2.5.1. Toplinska obrada materijala

Toplinska obrada je postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena svojstva – mehanička, fizička, kemijska (Matijević, 2016.).

Golubić (2019.) navodi da su temeljni parametri toplinske obrade, prikazani dijagramom na slici 18.:

- temperatura,  $T$  (K),  $\vartheta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- trajanje (vrijeme),  $t$  (s, min, h).

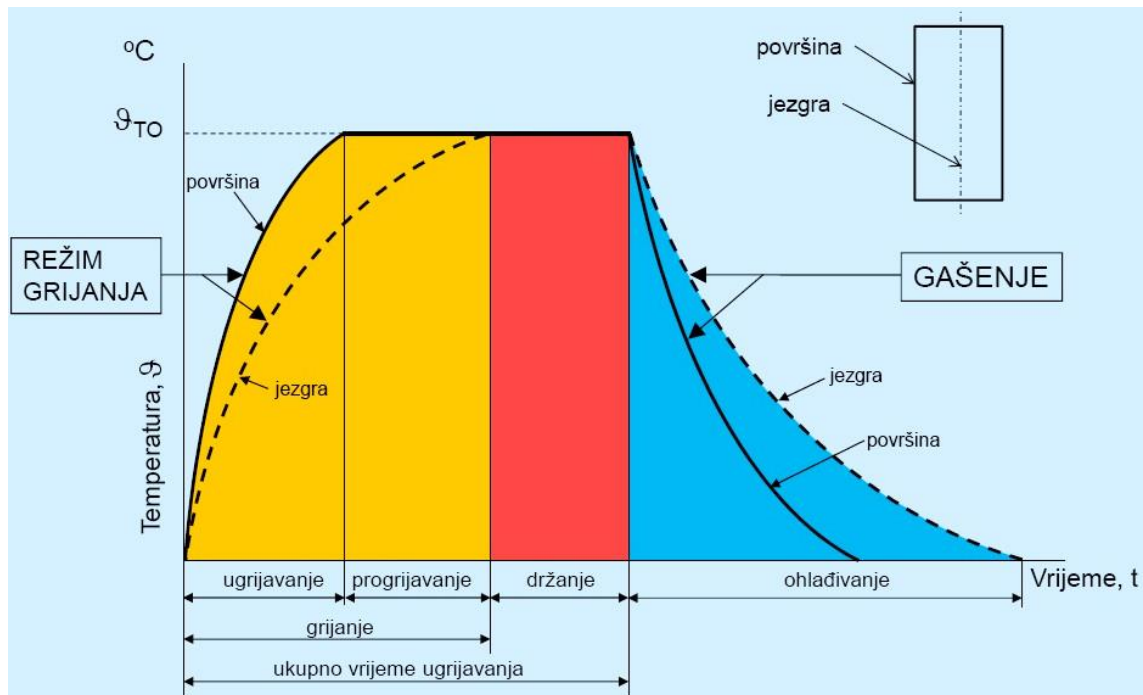


Slika 18. Toplinska obrada u dijagramu „temperatura – vrijeme“ (Izvor: Matijević, 2016.)

Toplinskom obradom čeliku se mijenja struktura (zrnatost, raspored kristala, napetosti, itd.). Većina toplinskih obrada usmjerena je stvaranju mješavine ferita i cementita kojom se ostvaruje odgovarajuća kombinaciju svojstava. To se postiže zagrijavanjem čelika do određene temperature, zadržavanjem na istoj (progrijavanjem) i zatim ohlađivanjem određenom brzinom. Toplinske obrade se dijele na: žarenja, kaljenja, popuštanja, poboljšavanja i površinska otvrdnjavanja (Kovač, 2007.).

**Kaljenje** čelika toplinska je obrada s ciljem postizanja što veće tvrdoće nakon gašenja i postizanje što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku (Krumes, 2000.). Prema istom autoru, postupak kaljenja sastoji se od tri faze, prikazane dijagramom na slici 19.:

- ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja na toj temperaturi,
- držanja na temperaturi austenitizacije (sa svrhom otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu),
- gašenja (sa svrhom postizanja martenzitne mikrostrukture).



Slika 19. Dijagram postupka kaljenja (Izvor: Matijević, 2016.)

Sredstvo za gašenje mora se birati i prema dimenzijama predmeta koji želimo zakaliti i prokaliti. Kaljivost je svojstvo čelika da se može zakaliti, a obuhvaća pojmove zakaljivost i prokaljivost. Zakaljivošću se smatra visina postizive tvrdoće nakon gašenja u idealnim uvjetima. Prokaljivost čelika (tehnološko svojstvo) predstavlja sposobnost čelika da postigne jednoličnu tvrdoću po poprečnom presjeku predmeta (Golubić, 2019.).

Prema Krumesu (2000.), osim postupaka kaljenja cijele mase strojnog dijela, u praksi se primjenjuju i postupci površinskog kaljenja. Kod primjene ovih postupaka površinski se ugrijavaju samo neki dijelovi proizvoda koje treba kaljenjem otvrdnuti. Za zagrijavanje se primjenjuju izvori topline velike gustoće energije: plinski plamenici, inducirana električna energija, laserski snop i snop elektrona. S obzirom na način ugrijavanja površinskog sloja, u praksi susrećemo sljedeće postupke površinskoga kaljenja čelika:

- plameno kaljenje,
- indukcijsko kaljenje,
- kaljenje laserskim snopom.

### 2.5.2. Toplinsko-kemijska obrada materijala

Toplinsko-kemijski (termokemijski, termodifuzijski) postupci jesu postupci toplinskih obrada koji se provode istodobnim kemijskim i toplinskim djelovanjem radi promjene sastava, strukture i svojstava površinskih slojeva proizvoda. Ugrijavanje i držanje proizvoda izvodi se u aktivnom mediju koji može biti u čvrstom, tekućem, plinovitom ili plazmatičnom stanju. Primjenom ovih postupaka povisuje se otpornost na trošenje, i to više nego što je moguće toplinskim obradama bez promjene sastava površinskog sloja, povisuje se postojanost na korozijsko djelovanje okoline, te se induciraju prednaprezanja povoljnog predznaka i veličine u površinskim slojevima predmeta (Golubić, 2019.).

Prema Stupnišku i Cajneru (2001.), toplinsko-kemijski postupci dijele se na dvije skupine:

- difuzijski postupci,
- toplinski postupci prevlačenja.

Kod difuzijskih postupaka promjena kemijskog sastava površinskih slojeva izvodi se povišenjem udjela metaloida (ugljika, dušika, bora) ili metala (kroma, aluminijska, silicija, vanadijska), često i do potpunog zasićenja. Toplinsko prevlačenje izvodi se:

- postupcima kemijskog prevlačenja iz parne faze – CVD postupci (engl. *Chemical Vapour Deposition*),
- postupcima plazmom potpomognutoga kemijskog prevlačenje iz parne faze – PACVD postupci (engl. *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*)
- postupcima fizikalnog prevlačenja iz parne faze – PVD postupci (engl. *Physical Vapour Deposition*).

U strojogradnji se najčešće primjenjuju postupci cementiranja, nitriranja, kombiniranih postupaka istovremene difuzije ugljika i dušika (karbonitriranje i nitrokarburiranje), te boriranja. Dosta rjeđe se primjenjuju postupci površinskog legiranja materijala primjenom lasera, pa o njima neće biti detaljnijeg obrazloženja.

**Boriranje** je termodifuzijski proces u kojem atomi bora (B), zbog svog malog promjera i velike pokretljivosti pri povišenim temperaturama, difundiraju u metalnu površinu i tvore intermetalne spojeve s atomima osnovnog metala. Rezultirajući boridni sloj izuzetno je tvrd i povećava otpornost površinskog sloja na abrazijsko trošenje. Štoviše, boriranje također poboljšava otpornost na adhezijsko trošenje i koroziju. Sve navedeno znači da se, pravilnim odabirom parametara i materijala za boriranje, životni vijek dijelova stroja može produžiti 3-10 puta (Milinović i sur., 2012.).

Najpovoljnije sredstvo za provođenje postupka boriranja je čvrsto sredstvo. To je, između ostalog, zbog mogućnosti brojnih varijacija, što omogućava da se sposobnost boriranja podesi točno po potrebi. Danas se sredstva za boriranje mogu podesiti tako da se dobije samo jednofazni sloj, ali to ovisi o % C, drugim legirnim elementima u čeliku i parametrima obrade boriranja. Međutim, glavna prednost boriranja u čvrstom sredstvu, koje se provodi u komornoj peći, su relativno niski troškovi uređaja i sredstava u odnosu na ostale načine boriranja. Osim toga, postupak se može provesti u svakoj kalionici koja ima komornu peć za cementiranje, s mogućnosti ugrijavanja na barem 1000 °C. Najekonomičniji je postupak boriranja u aktivnoj smjesi na bazi borova karbida, koji je poznat pod komercijalnim nazivom EKABOR. Ovisno o veličini zrna i svojstvima, postoji više vrsta EKABOR sredstava. Boriranje u krutom sredstvu je najstariji i najčešće korišteni postupak boriranja. Prema načinu provođenja i korištenoj opremi, ovaj postupak sličan je cementiranju u krutom sredstvu. Postupak se provodi na način da se prethodno pripremljeni dijelovi stavljaju u kutije izrađene od čeličnog lima i sa svih strana oblažu praškom za boriranje. Pri tome se mora voditi računa o tome da debljina sloja praška za boriranje sa svih strana predmeta iznosi minimalno 8 do 10 mm. Ovakav sloj osigurat će jednoliko boriranje. Kutija se potom zatvara, a za razliku od cementiranja, poklopac kutije nije potrebno omazivati glinom. Nakon pakiranja, kutija se stavlja u peć zagrijanu na temperaturu boriranja. Na toj temperaturi aktivator će reagirati sa sredstvom bogatim borom te će doći do stvaranja plinovitih spojeva bora koje difuzijom ulaze u površinske slojeve obratka. Nakon završetaka boriranja, kutije se vade iz peći i hlade na zraku. Ukoliko se boriraju materijali skloni deformacijama, kutije se hlade u peći (Krumes, 2004.).

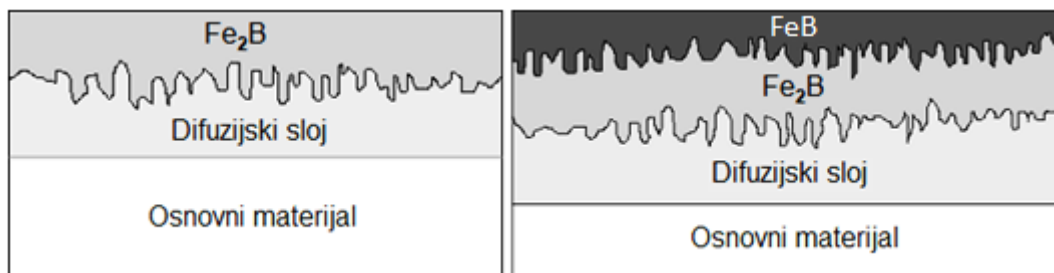
Primjer kutije za boriranje s proizvodom u granulatu prikazan je na slici 20.



Slika 9. Kutija za boriranje s proizvodima u granulatu (Izvor: Nabertherm, 2007.)

Iako je boriranje najprikladnije za ugljične i niskolegirane čelike, može se primijeniti i na legure na bazi Ni, Co, Ti, W i Mo i sinterirane tvrde materijale. Boriranje ugljičnih čelika obično se provodi na temperaturama 800-1050 °C i vremenu obrade 1-12 h. Dobiveni površinski sloj, karakteristične pilaste morfologije, može se sastojati od jedne faze željeznog borida ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) ili može biti dvofazan ( $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ). Iako je  $\text{FeB}$  tvrdi (1800-2100 HV), od  $\text{Fe}_2\text{B}$  (1400-1600 HV), smatra se nepoželjnim zbog svoje krhkosti (Milinović i sur., 2012.).

Slika 21. prikazuje shemu jednofaznog i dvofaznog boridnog sloja.



Slika 21. Shema jednofaznog i dvofaznog boridnog sloja

(Izvor: IBC Coatings Technologies, 2023.)

### 2.5.3. Nataljivanje materijala

Prema Alar i sur. (2011.), nataljivanje i navarivanje su slične tehnologije prevlačenja materijala, ali između njih postoje i određene razlike. Nataljivanje je postupak nanošenja prevlake bez taljenja podloge, dok je navarivanje postupak prevlačenja uz taljenje podloge. Također, nataljivanjem se ostvaruju tanje prevlake bez strukturnih promjena u podlozi, a navarivanjem se dobivaju deblje, hrapavije prevlake, uz strukturne promjene u podlozi na mjestu prevlake.

Indukcijsko nataljivanje temelji se na zagrijavanju i topljenju dodatnog materijala pod djelovanjem visokofrekventnih struja. Ovo je najtehnološkiji postupak za neke vrste dijelova zbog jednostavne opreme, lakog procesa nanošenja i, kao rezultat toga, odsutnosti potrebe za zavarivačima visoke kvalifikacije. Posebno je indukcijsko nataljivanje našlo najširu zastupljenost u prevlačenju radnih elemenata poljoprivrednih i cestovnih strojeva, te u nekim drugim granama gospodarstva (Poulka i sur., 2014.).

Primjenu tehnologije indukcijskog nataljivanja u zaštiti od trošenja jako puno su istraživali kineski autori. Tako su Yang i Li (2011.) ukazali na činjenicu da se, nanošenjem sloja legure otporne trošenju na površinu mekanog čelika, mogu zadržati prednosti mekanog čelika, poput izvrsne plastičnosti i žilavosti, a pritom se može i značajno poboljšati površinska



otpornost na trošenje i udarce. Time se produljuje vijek trajanja proizvoda te štedi materijal, uz dobru ekonomičnost. Naglašavaju da je, među mnogim postupcima prevlačenja, visokofrekventno indukcijsko nataljivanje privuklo veliku pozornost zbog lakog oblikovanja prevlake, učinkovitosti proizvodnje itd.

Tehnika indukcijskog grijanja postala je vrlo popularna u industriji – glavni razlozi za to su njihova brza brzina zagrijavanja, dobra ponovljivost i niska potrošnja energije. Riječ je o tehnici zagrijavanja elektro vodljivih materijala kao što su metali i metalne legure. Obično se koristi u procesu zagrijavanja prije obrade metala, u toplinskoj obradi, zavarivanju i taljenju. Pri tome je visokofrekventno indukcijsko nataljivanje površina jedno je od najvažnijih područja primjene tehnike indukcijskog grijanja (Li i sur., 2016.).

Prema Xu i sur. (2015.), dodatni materijali, koji stvaraju abrazijski otpornu prevlaku u postupku indukcijskog nataljivanja, mogu biti u obliku trake, žice, šipke, praha, paste ili njihove mješavine.

Najčešće primjenjivani oblik dodatnog materijala je prah, a njegov sastav definira abrazijsku otpornost prevlake. U većini triboloških istraživanja prahovi za indukcijsko nataljivanje bile su legure na bazi nikla (Ni), uz značajan sadržaj kroma (Cr) (Yu i sur., 2011.; Zhu i sur., 2013.; Zhu i sur., 2014.; Liu i Zhang, 2015.).

Navedeni prahovi prvenstveno su namijenjeni postupcima toplog naštrcavanja, ali se često primjenjuju i kod indukcijskog nataljivanja. Uspoređujući ostvarena svojstva prevlaka (mikrotvrdoća i abrazijska otpornost), dobivenih primjenom oba postupka s istovrsnim prahovima, vidljiva je značajna prednost indukcijske prevlake, pri čemu je ostvarena veća mikrotvrdoća (> 5 %) i značajno viša abrazijska otpornost (> 50 %) (Zhu i sur., 2013.).

### 3. MATERIJAL I METODE

#### 3.1. Uzorci za ispitivanje

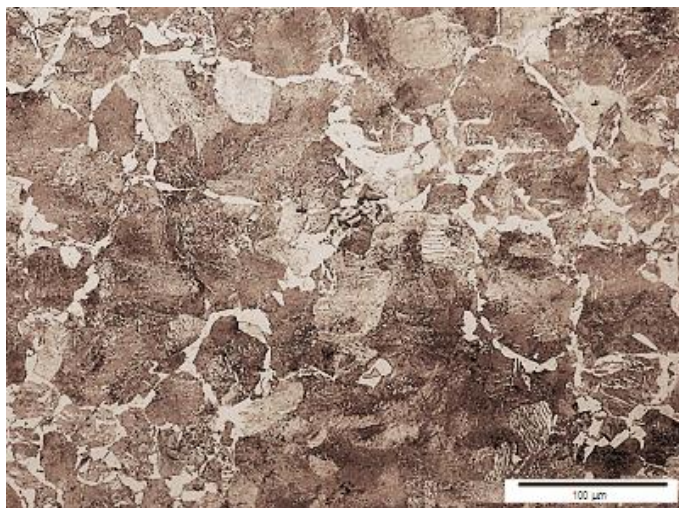
Uzorci za ispitivanje pokusom trošenja, dimenzija 20×40×5 mm, izrađeni su od nelegiranog ugljičnog čelika za poboljšavanje C45E (Č 1531). Uzorci su izrezani iz plosnatog profila 40×6 mm i glodanjem doradjeni na potrebnu dimenziju. Površine koje se izlažu trošenju (20×40 mm) obrađene su finim brušenjem zbog dodatnih postupaka stvaranja prevlaka.

Kemijski sastav čelika (osnovni materijal – supstrat) prikazan je u tablici 7.

Tablica 7. Kemijski sastav osnovnog materijala C45E (Izvor: Strojopromet, 2011.)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	ostalo
%	0,42-0,50	≤0,40	0,50-0,80	≤0,035	≤0,035	≤0,40	≤0,10	≤0,40	Cr+Mo+Ni ≤0,40

Čelik od kojeg su izrađeni uzorci je u normaliziranom stanju, s površinskom tvrdoćom oko 210 HB (≈19 HRC) i feritno-perlitnom mikrostrukturom, prikazanom na slici 22.



Slika 22. Mikrostruktura čelika u normaliziranom stanju  
(Izvor: Laboratorij za materijalografiju FSB Zagreb)

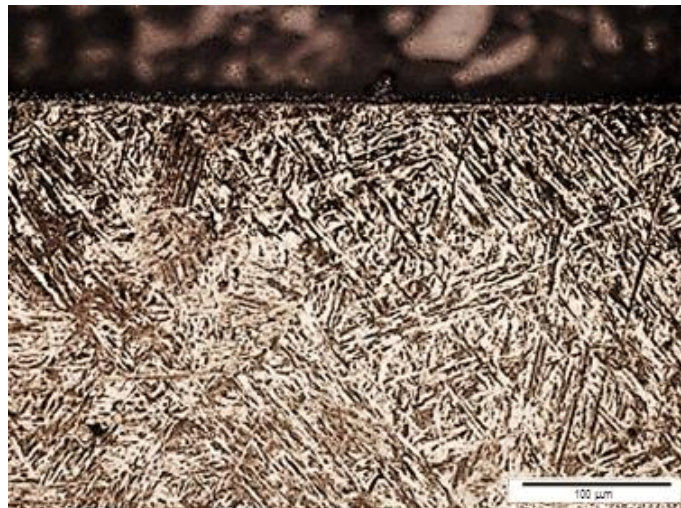
Analize mikrostruktura i mjerenja tvrdoća uzoraka provedene su u suradnji s Fakultetom strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, u Laboratoriju za materijalografiju koji je na Zavodu za materijale. Mikrostrukture uzoraka analizirane su optičkim mikroskopom Olympus GX51. Površinska tvrdoća uzoraka mjerena je mikrotvrdomjerom PMT-3.

Površine uzoraka obrađene su toplinskim i toplinsko-kemijskim postupcima (kaljenje i boriranje), te indukcijskim navarivanjem (nataljivanjem, platiranjem). Cilj ovih postupaka je da se u površinskoj zoni uzoraka promjeni sastav i ostvare prevlake koje imaju poboljšana svojstva otpornosti na trošenje.

Postupci kaljenja i boriranja provedeni su u laboratorijima Katedre za toplinsku obradu i inženjerstvo površina Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

### 3.1.1. Kaljeni uzorci

Kaljenje čeličnih uzoraka provedeno je bez zaštitne atmosfere, progrijavanjem uzoraka u elektropeći na 850 °C, te nakon toga gašenjem u vodi sobne temperature. Ovim postupkom postignuta je martenzitna struktura tvrdoće 698 HV<sub>0,2</sub> (≈58 HRC), prikazana na slici 23.



Slika 23. Mikrostruktura kaljenog uzorka  
(Izvor: Laboratorij za materijalografiju FSB Zagreb)

### 3.1.2. Nataljeni uzorci

Prevlaka na uzorcima izrađena je tehnologijom visokofrekventnog indukcijskog nataljivanja (high frequency induction cladding). U izradi nataljene prevlake primjenjen je dodatni materijal u obliku praha za plameno naštrcavanje uz istovremeno utaljivanje, sastava Ni-Cr-Si-B-Fe (UTP HA-7, Böhler Welding). Primjenom navedenog praha ostvaruju se prevlake površinske tvrdoće do 60 HRC, dobre otpornosti na koroziju i trošenje, čak i pri visokim radnim temperaturama, koje su namijenjene zaštiti tarnih površina ležaja, oštrica noževa, kalupa za prešanje, bregastih osovina, itd. Prah ima granulaciju 106±20 μm i deklarirani kemijski sastav prikazan u tablici 8.

Tablica 8. Kemijski sastav praha UTP HA-7 (Izvor: Westec.al, 2015)

Element	C	Si	Cr	B	Fe	Ni
%	0,75	4,5	15,0	3,2	3,5	ostatak

Uređaj za indukcijsko zagrijavanje, visokofrekventni indukcijski pretvarač ELING IP-30VF, na kome su pripremljeni uzorci za istraživanje, ranije se primjenjivao u zaštiti od trošenja poljoprivrednih alata za obradu tla u tvrtci „Belje Remont“ Beli Manastir, a trenutno je u laboratoriju Zavoda za poljoprivrednu tehniku i obnovljive izvore energije Fakulteta agrobiotehničkih znanosti. Uređaj, prikazan na slici 24., sastoji se od:

- visokofrekventnog generatora,
- induktora za zagrijavanje ravnih ploha radnih površina alata za obradu tla,
- uređaja za pričvršćivanje dijelova u induktoru,
- autonomne instalacije postrojenja za hlađenje vode.



Slika 24. Uređaj za indukcijsko zagrijavanje (Izvor: Rašić, 2023.)

Najvažniji dio uređaja je visokofrekventni generator, čije karakteristike su u tablici 9.

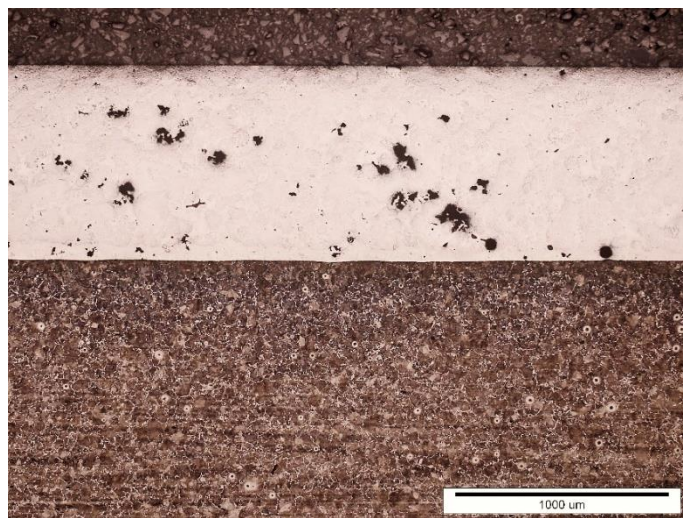
Tablica 9. Karakteristike visokofrekventnog generatora (Izvor: Natpisna pločica uređaja)

Snaga uređaja	60 kW (75 kVA) – podesivo
Frekvencija	66 kHz – podesivo
Oblik prevlake	određuje induktor
Širina prevlake	do 200 mm
Duljina prevlake	do 500 mm
Debljina prevlake	1-6 mm (ovisno o količini praha)
Brzina nanošenja prevlake	2-5 mm/s
Napajanje	380 V
Izlazni napon	560 V
Način obrade	kontinuiran
Način hlađenja	autonomni (voda)

Postupak izrade prevlake i pripreme uzoraka za pokus trošenja obuhvaća sljedeće faze:

- Nanošenje praha na površinu osnovnog materijala i ravnomjerno raspoređivanje na debljinu od 2,5 mm;
- Taljenje praha i stvaranje prevlake na površini osnovnog materijala zagrijavanjem na 1150 °C, prolazom kroz induktor uređaja;
- Mehaničko uklanjanje troske s površine uzoraka nakon hlađenja prevlake.

Prikazanom tehnologijom na uzorcima je dobiven nataljeni sloj debljine oko 1 mm, površinske tvrdoće 750 HV<sub>0,2</sub> (≈60 HRC), s mikrostrukturom prikazanom na slici 25.



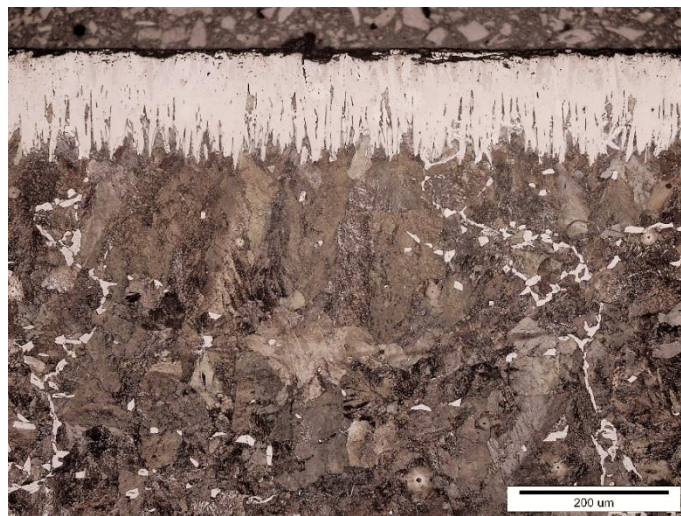
Slika 25. Mikrostruktura nataljenog uzorka  
(Izvor: Laboratorij za materijalografiju FSB Zagreb)

### 3.1.3. Borirani uzorci

Uzorci za pokus trošenja borirani su u krutom sredstvu za boriranje (granulat EKABOR 3), zagrijavanjem na temperaturu 1000 °C, držanjem na temperaturi 4 sata, nakon čega su ohlađeni na zraku.

Izmjerena debljina dobivene borirane prevlake je 65-135 μm, a srednja vrijednost izmjerene tvrdoće je oko 1320 HV<sub>0,2</sub> (>72 HRC). Osnovni materijal ima srednju vrijednost izmjerene tvrdoće oko 270 HV<sub>0,2</sub> (≈29 HRC).

Mikrostruktura prevlake dobivene boriranjem prikazana je slikom 26.



Slika 26. Mikrostruktura boriranog uzorka  
(Izvor: Laboratorij za materijalografiju FSB Zagreb)

Na slici se može uočiti dobra uzubljenost boridnog sloja u osnovni materijal i relativno kompaktna struktura prevlake u potpovršinskom sloju.

### 3.2. Uređaj za pokus trošenja

Uređaj za pokus trošenja predstavlja primjer simulacijskog tribometra, koji u laboratorijskim uvjetima oponaša stvarni proces trošenja određenog alata za obradu tla, uz mogućnost kontrolirane promjene uvjeta trošenja, u skladu s planiranim parametrima pokusa. U tom smislu, uređaj omogućuje:

- simulaciju procesa trošenja uzoraka različitih kvaliteta materijala,
- primjenu odabranog abraziva u količini potrebnoj za izvođenje pokusa,
- izbor različitih parametara gibanja uzoraka:

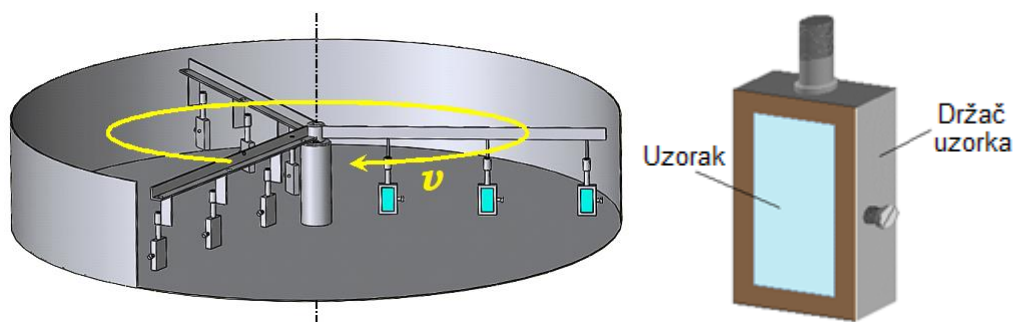
- brzine gibanja uzoraka u rasponu 0,5-3,5 m/s
- kuta sudara abrazivskih čestica s trošenom površinom uzorka u rasponu 0-90°,
- planiranje i ponavljanje stanja pokusa u cilju obrade rezultata statističkim metodama,
- istovremeno trošenje tri uzorka u jednakim uvjetima izvođenja pokusa.

Uređaj je konstruiran u obliku posude promjera 1,0 m i dubine 0,4 m, u koju se može usuti 250 do 300 kg abraziva (pijesak, tlo i dr.). Trokraki nosač uzoraka rotira oko središnje osi uređaja brzinom od  $66 \text{ min}^{-1}$ . Slika 27. prikazuje uređaj za pokus trošenja. Tijekom rada, na uređaj se postavlja poklopac posude, čime se sprječava razbacivanje abraziva i prašina.



Slika 27. Uređaj za pokus trošenja (Izvor: Rašić, 2023.)

Odabrana brzina gibanja uzorka definira se kao obodna brzina na nosaču uzoraka, koja se nalazi na udaljenosti izračunatog polumjera od središnje osi rotacije uređaja. Uzorci su postavljeni u držače koji omogućuju trošenje samo jedne plohe uzorka ( $20 \times 40 \text{ mm}$ ), dok su ostale plohe zaštićene od trošenja držačem. Slika 28. prikazuje shemu rada uređaja i način postavljanja uzorka u držač.



Slika 28. Shema rada uređaja za pokus trošenja i držač uzorka (Heffer i sur., 2018.)

### 3.3. Abraziv u pokusu trošenja

Pokus trošenja izveden je u masi silikatnog pijeska krupnoće 212-300  $\mu\text{m}$ , deklariranog kao Ottawa AFS 50/70, koji se koristi za tribološke pokuse abrazijskog trošenja (Ivušić, 1998.).

### 3.4. Parametri pokusa trošenja

Parametri provedenog pokusa trošenja bili su: vrsta prevlake i brzina gibanja uzorka.

Promjena brzine gibanja u testu trošenja bila je u rasponu uobičajene brzine alata za osnovnu obradu tla u uvjetima eksploatacije (3,0-10,0 km/h), odnosno 1,0-3,0 m/s. Slijedom toga, planirano je da se pokus izvodi pri brzinama gibanja uzoraka od 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; i 3,0 m/s.

Put trošenja uzoraka jednak je za sve uzorke i određen je na temelju ranijih istraživanja (Heffer, 2002.; Heffer i sur., 2018.; Vidaković i sur., 2022.), te iznosi 50000 m (50 km).

Prethodno je objašnjen način određivanja brzina gibanja uzoraka na uređaju, putem obodnih brzina i izračunatih polumjera na nosaču uzoraka (poglavlje 3.2.). Svaki uzorak na izračunatom polumjeru prolazi put trošenja duljine opsega kružnice pri jednom okretaju. Ukupni put trošenja svakog uzorka izračunava se kao ukupni broj okretaja uzorka na određenoj kružnici, da bi se prešlo 50000 m. Ukupni broj okretaja uzoraka očitava se na brojaču okretaja uređaja. Na temelju opisanoga, dobiveni su parametri gibanja u tablici 10.

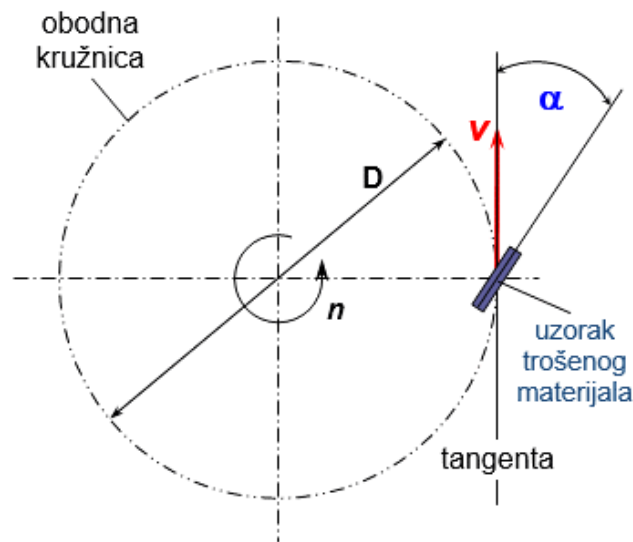
Tablica 10. Kinematski parametri gibanja uzoraka u pokusu trošenja

Brzina gibanja $v$ (m/s)	Promjer obodne kružnice D (m)	Opseg obodne kružnice (m)	Ukupni broj okretaja uzorka (-)
1,0	0,289	0,909	55000
1,5	0,434	1,364	36667
2,0	0,579	1,818	27500
2,5	0,723	2,273	22000
3,0	0,868	2,727	18333

Površina uzoraka, izložena trošenju, postavljena je pod kutem  $\alpha$  od  $45^\circ$  u odnosu na smjer naleta abrazijskih čestica. Odabrani kut je u skladu s prosječnim kutom rezanja pri oranju ( $\gamma$ ), što ga zatvaraju oštrica lemeša (raonika) pluga i smjer oranja (zid brazde), a čija veličina varira u rasponu od  $35^\circ$  do  $50^\circ$  (Zimmer i sur., 2014.). Taj kut određen je postavljanjem ispitnog uzorka pod odabranim kutom u odnosu na tangentu obodne kružnice određenog



promjera ( $D$ ), pripadajuće određenoj obodnoj brzini gibanja uzorka ( $v$ ), kako je to shematski prikazano na slici 29.



Slika 29. Shema postavljanja ispitnog uzorka (Izvor: Rašić, 2023.)

### 3.5. Utvrđivanje rezultata pokusa trošenja

U svrhu statističke analize rezultata, test je proveden u tri ponavljanja za svaku prevlaku pri svakoj brzini gibanja.

Masa svakog uzorka izmjerena je prije i nakon provođenja testa analitičkom vagom Mettler B5C 1000, s preciznošću od  $10^{-4}$  g. Prije svakog mjerenja uzorci su temeljito očišćeni od nalijepljenih sitnih čestica abraziva, isprani pod mlazom tople vode i osušeni strujom toplog zraka.

#### 4. REZULTATI

Rezultati pokusa trošenja ispitivanih prevlaka prikazani su u tablicama 11., 12. i 13.

Tablica 11. Rezultati pokusa trošenja kaljenih uzoraka

Brzina (m/s)	Ponavljanje pokusa	Masa uzorka (g)		Gubitak mase (g)
		prije pokusa	nakon pokusa	
1,0	I.	33,1055	33,1013	<b>0,0042</b>
	II.	33,1013	33,0973	<b>0,0040</b>
	III.	33,0973	33,0929	<b>0,0044</b>
1,5	I.	34,0027	33,9960	<b>0,0067</b>
	II.	33,9960	33,9886	<b>0,0074</b>
	III.	33,9886	33,9815	<b>0,0071</b>
2,0	I.	33,4815	33,4723	<b>0,0092</b>
	II.	33,4723	33,4629	<b>0,0094</b>
	III.	33,4629	33,4531	<b>0,0098</b>
2,5	I.	32,9478	32,9323	<b>0,0155</b>
	II.	32,9323	32,9161	<b>0,0162</b>
	III.	32,9161	32,9001	<b>0,0160</b>
3,0	I.	34,1093	34,0832	<b>0,0261</b>
	II.	34,0832	34,0575	<b>0,0257</b>
	III.	34,0575	34,0321	<b>0,0254</b>

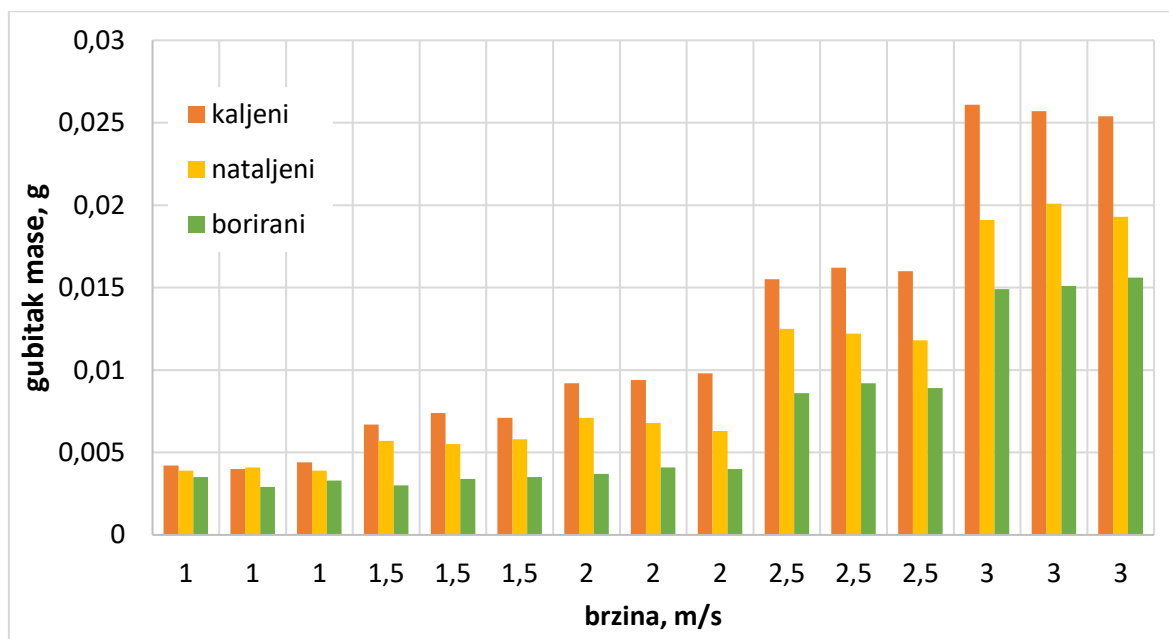
Tablica 12. Rezultati pokusa trošenja nataljenih uzoraka

Brzina (m/s)	Ponavljanje pokusa	Masa uzorka (g)		Gubitak mase (g)
		prije pokusa	nakon pokusa	
1,0	I.	35,1055	35,1016	<b>0,0039</b>
	II.	35,1016	35,0975	<b>0,0041</b>
	III.	35,0975	35,0936	<b>0,0039</b>
1,5	I.	34,7871	34,7814	<b>0,0057</b>
	II.	34,7814	34,7759	<b>0,0055</b>
	III.	34,7759	34,7701	<b>0,0058</b>
2,0	I.	35,2797	35,2726	<b>0,0071</b>
	II.	35,2726	35,2658	<b>0,0068</b>
	III.	35,2658	35,2595	<b>0,0063</b>
2,5	I.	35,0342	34,0217	<b>0,0125</b>
	II.	34,0217	34,0095	<b>0,0122</b>
	III.	34,0095	33,9977	<b>0,0118</b>
3,0	I.	35,3120	35,2929	<b>0,0191</b>
	II.	35,2929	35,2728	<b>0,0201</b>
	III.	35,2728	35,2535	<b>0,0193</b>

Tablica 13. Rezultati pokusa trošenja boriranih uzoraka

Brzina (m/s)	Ponavljjanje pokusa	Masa uzorka (g)		Gubitak mase (g)
		prije pokusa	nakon pokusa	
1,0	I.	32,1287	32,1252	<b>0,0035</b>
	II.	32,1252	32,1223	<b>0,0029</b>
	III.	32,1223	32,1190	<b>0,0033</b>
1,5	I.	31,9686	31,9656	<b>0,0030</b>
	II.	31,9656	31,9622	<b>0,0034</b>
	III.	31,9622	31,9587	<b>0,0035</b>
2,0	I.	32,2156	32,2119	<b>0,0037</b>
	II.	32,2119	32,2078	<b>0,0041</b>
	III.	32,2078	32,2038	<b>0,0040</b>
2,5	I.	32,1867	32,1781	<b>0,0086</b>
	II.	32,1781	32,1689	<b>0,0092</b>
	III.	32,1689	32,1600	<b>0,0089</b>
3,0	I.	31,9995	31,9846	<b>0,0149</b>
	II.	31,9846	31,9695	<b>0,0151</b>
	III.	31,9695	31,9539	<b>0,0156</b>

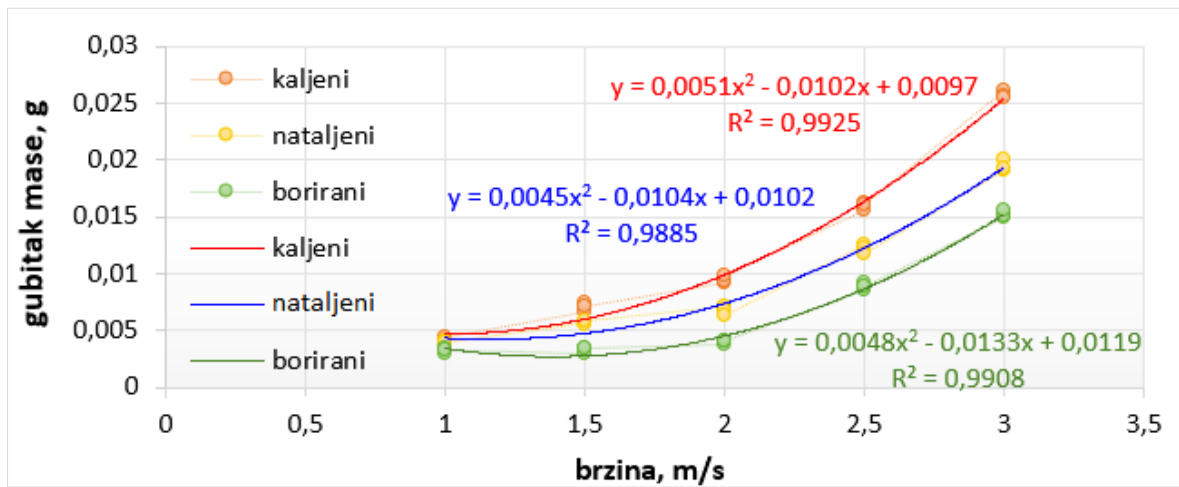
Gubitci masa uzoraka ispitivanih prevlaka u tri ponavljanja pokusa prikazani su grafom 1.



Grafikon 1. Gubitci masa uzoraka (trošenje) ispitivanih prevlaka

Rezultati pokusa trošenja obrađeni su regresijskom analizom, kako bi se utvrdila veza između trošenja ispitivanih prevlaka i promjene brzine gibanja uzoraka u masi abraziva.

Ovisnost je interpretirana za svaku prevlaku u obliku regresijske krivulje, uz pripadajući koeficijent determinacije  $R^2$ , što je prikazano grafom 2.



Grafikon 2. Ovisnost trošenja prevlaka o brzini gibanja uzoraka

## 5. RASPRAVA

U istraživačkom dijelu rada, kao uzorci materijala koji su korišteni u pokusu trošenja, odabrani su predstavnici tvrdih triboloških prevlaka koje se ostvaruju različitim tehnološkim postupcima: toplinskim (kaljeni uzorci), toplinsko-kemijskim (borirani uzorci) i postupcima prevlačenja osnovnog materijala drugim materijalom (nataljivanje, kao srodni postupak navarivanja). Svi odabrani tehnološki postupci su u kategoriji relativno jednostavnih za provedbu (čak i u proizvodnim uvjetima, ne samo u laboratorijskim), što ih čini primjenjivim u zaštiti alata za obradu tla od trošenja u eksploatacijskim uvjetima. Navedeno je u skladu s podacima brojnih autora (Pintarić, 1988.; Miloš i sur., 1993.; Ivušić, 1998.; Heffer, 2002.; Kovač, 2007.; Banaj i sur., 2008.; Poulka i sur., 2014.; Heffer i sur., 2018.; Vidaković i sur., 2022.).

Analiza uzoraka izrađenih odabranim tehnološkim postupcima potvrdila je da se istima postiže povećana površinska tvrdoća (kaljeni ~58 HRC, nataljeni ~60 HRC, borirani ~72 HRC) u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala (normalizirano stanje, ~19 HRC), što je temeljno svojstvo kojim se poboljšava otpornost prema abrazijskom trošenju, kao što navode brojni autori (Mulhearn i Samuels, 1962.; Czichos, 1978.; Zum Gahr, 1987.; HDMT, 1993.; Ivušić, 1998.; Heffer i sur., 1998.; Stupnišek i Matijević, 1998.; Grilec i sur., 2015.; Schauerl, 2000.; Heffer, 2002.; Krumes, 2004.; Jakovljević, 2007.; Holmberg i Matthews, 2009.; Purcek, 2020.). Time je opravdana i primjena navedenih postupaka.

Na temelju izračunatih prosječnih gubitaka masa uzoraka tvrdih prevlaka u pokusu trošenja utvrđeno da kaljeni uzorci imaju značajno manju otpornost na abrazijsko trošenje (veći gubitak mase) u odnosu na borirane i nataljene slojeve, što se može pripisati manjoj površinskoj tvrdoći u odnosu na navedene slojeve. Nataljeni slojevi pokazali su manju otpornost prema trošenju u odnosu na borirane slojeve, što se također može pripisati manjoj površinskoj tvrdoći u odnosu na borirane slojeve.

Rezultati provedenog istraživanja pokazali su da kod svih ispitivanih uzoraka, gledajući svaku pojedinačnu prevlaku, abrazijsko trošenje raste s povećanjem brzine gibanja, što u praktičnom smislu znači da se trošenje radnih dijelova poljoprivrednih alata za obradu tla povećava s povećanjem radne brzine. Razlike navedenog porasta trošenja, uspoređujući pojedine prevlake, također rastu s povećanjem radnih brzina. Takva povećanja trošenja, unutar pojedinih prevlaka i usporedbom između njih, u skladu su s rezultatima istraživanja više autora (Heffer, 2002.; Kovač, 2007.; Heffer i sur., 2018.; Vidaković i sur., 2022.).

Gubici masa uzoraka iz pokusa trošenja obrađeni su regresijskom analizom, s ciljem utvrđivanja povezanosti trošenja ispitivanih prevlaka i promjene brzine gibanja uzoraka u masi abraziva. Za svaku prevlaku izračunata je jednadžba regresije, a povezanost je interpretirana u obliku regresijske krivulje i pripadajućeg koeficijenta determinacije  $R^2$ . Utvrđeno je da kod svake od tri ispitivane prevlake postoji ovisnost trošenja (gubitaka masa) o promjeni brzine gibanja, koja se može izraziti jednadžbom kvadratnog polinoma  $y = ax^2 + bx + c$ , pri čemu je:  $x$  – brzina gibanja (m/s),  $y$  – gubitak mase (g). Pripadajući koeficijenti determinacije ( $R^2_{\text{kaljeni}} = 0,9925$ ;  $R^2_{\text{nataljeni}} = 0,9885$ ;  $R^2_{\text{borirani}} = 0,9908$ ) pokazuju da je navedena ovisnost vrlo jaka, budući da je  $R^2$  vrlo visok (približan jedinici – „1“). Navedena ovisnost trošenja (gubitaka masa) o promjeni brzine gibanja u skladu je s rezultatima ranijih istraživanja (Heffer, 2002.; Heffer i sur, 2018.; Vidaković i sur., 2022.)

Provedenim istraživanjem također je potvrđeno da se svi oblici ispitivanih prevlaka mogu primijeniti na dijelovima poljoprivrednih strojeva, u smislu zaštite od abrazijskog trošenja, budući da niti u jednom slučaju pokusa trošenja nije došlo do „probijanja“ prevlake i/ili njezinog odvajanja od osnovnog materijala na kome su izrađene.

## 6. ZAKLJUČAK

Alati za obradu tla, koji se primjenjuju u poljoprivredi, tijekom eksploatacije su izloženi abrazijskom trošenju česticama tla. Takvom obliku trošenja najjače su izloženi radni dijelovi alata koji su u neposrednom kontaktu s tlom (plugovi, podrivači, tanjurače, kultivatori itd.). Posljedice trošenja izražavaju se u obliku promjena oblika i dimenzija alata, što smanjuje njihovu učinkovitost, uslijed čega se povećavaju i troškovi obrade. U konačnici, takvo trošenje može se izravno odraziti na efikasnost i ekonomičnost poljoprivredne proizvodnje.

Kako bi se navedene negativne posljedice izbjegle, poduzimaju se različite mjere zaštite koje imaju za cilj smanjenje trošenja alata (tribološke mjere). Najčešća mjera je pritom oplemenjivanje radne površine alata primjenom abrazijski otpornih materijala, kojima se ista zaštićuje. Time se postiže otpornija radna površina, manje trošenje i dulji radni vijek alata.

U provođenju navedene zaštite, abrazijski otpornim materijalima, primjenjuju se različiti tehnološki postupci, kojima se ostvaruju tvrde tribološke prevlake na radnim površinama alata za obradu tla. Specifičnost sustava u kome se zbiva proces trošenja i čimbenici koji utječu na taj proces definiraju vrste postupaka koji su pritom primjenjivi.

Provedeno istraživanje kaljenih, nataljenih i boriranih uzoraka pokazalo je da opravdanost primjene takvih tvrdih prevlaka, zbog učinaka koji se ostvaruju, a koji su izraženi u obliku usporedbe razina trošenja (gubitaka masa) uzoraka prevlaka.

Od istraživanih prevlaka, najveće trošenje je imala kaljena prevlaka, zatim nataljena prevlaka, a najmanje se trošila tvrda borirana prevlaka. Utvrđena razlika u gubicima masa (trošenju) bila je izraženija pri većim brzinama gibanja istraživanih uzoraka, tj. prosječni gubitak mase (trošenje) uzoraka kaljene prevlake pri brzini 3 m/s bio je do 70 % veći od trošenja borirane prevlake, dok je pri brzini 1 m/s trošenje kaljenih uzoraka bilo veće oko 30 %. I u usporedbi nataljenih i boriranih uzoraka pokazala se slična tendencija – pri brzini 1 m/s trošenje nataljenih uzoraka bilo je oko 20 % veće od trošenja boriranih uzoraka, a pri 3 m/s razlika u trošenju je porasla na oko 28 %. U usporedbi kaljenih i nataljenih uzoraka utvrđeno je da je trošenja kaljenih uzoraka pri 1 m/s oko 7 % veće od trošenja nataljenih uzoraka, a pri brzini 3 m/s oko 30 % veće od trošenja nataljenih uzoraka.

Prikazani postupci zaštite od trošenja (toplinska obrada, toplinsko-kemijska obrada i nataljivanje) predstavljaju primjere koji daju pozitivne karakteristike ostvarenih zaštita od trošenja, te koje imaju mogućnost primjene u poljoprivrednoj praksi.

## 7. POPIS LITERATURE

1. Alar, V.; Šimunović, V.; Juraga, I. (2011.): Teorijske osnove korozijskih procesa i metode zaštite. Autorizirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
2. Ausec, A. (2018.): Analiza trošenja diskova tanjurače na pneumatskoj sijačici „Väderstad Rapid 400“. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek
3. Banaj, Đ., Duvnjak, V., Tadić, V., Kanisek, J., Turkalj, D. (2008.): Tehničko-tehnološki aspekti primjene novih oblika lemeša pluga. Poljoprivreda, 14(2008)1, 41-46
4. Czichos, H. (1978.): Tribology – a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear. Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York
5. DGE - Smart Specialty Chemicals (2020.): What Is Wear And How To Prevent It? <https://dge-europe.com/what-is-wear/> (17.05.2023.)
6. Filetin, T.; Kovačiček, F. (1993.): Materijali u strojarstvu - tendencije razvoja i primjene. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju (HDMT), Zagreb
7. Fröba, N. (1991.): Belastungskollektive bei Pflugwerkzeugen und deren Anwendung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 52, Düsseldorf, Deutschland.
8. Global Applications Team (2021.): Evaluating Tribocorrosion - Chemical and Mechanical Wear of Materials. <https://blog.ducom.com/tribocorrosion> (17.05.2023.)
9. Golubić, S. (2019.): Tehnički materijali. Veleučilište u Bjelovaru
10. Grilec, K.; Jakovljević, S.; Marić, G. (2015.): Tribologija u strojarstvu. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
11. Heffer, G. (2002.): Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih abrazijskih čestica. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
12. Heffer, G.; Jurić, T.; Kralik, D.; Vlaktić, I. (1998.): Tribološka zbivanja u procesu osnovne obrade tla. Zbornik radova 26. međunarodnog simpozija „Aktualni zadaci mehanizacije poljoprivrede“, Opatija, 1998., 219-226



13. Heffer, G.; Samardžić, I.; Schauerl, Z.; Vidaković, I. (2018.): Wear of Induction Cladded Coating in the Abrasive Mass at Various Speeds and Impact Angles. *Technical Gazette* 25, 6(2018), 1776-1782
14. Heffer, G.; Vujčić, M.; Jurić, T. (1998.): Trošenje poljoprivrednih oruđa česticama tla. *Strojarstvo*, 40(5,6)1998, 221-227
15. Hogmark, S.; Hedenquist, P. (1994.): Tribological characterization of thin, hard coatings, *Wear* 179(1994), 147-154
16. Holmberg, K.; Matthews, A. (2009.): *Coatings Tribology – Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Second Edition. Elsevier, Amsterdam-Boston-Heidelberg-London-New York-Oxford-Paris-San Diego-San Francisco-Singapore-Sidney-Tokio
17. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju – HDMT (1993.): Inženjerstvo površina. *Bilten Hrvatskog društva za materijale i tribologiju*, br. 1/93, Zagreb
18. IBC Coatings Technologies (2023.): Boriding/Boronizing (DHB). <https://www.ibccoatings.com/boriding-boronizing-dhb/> (12.06.2023.)
19. Ivušić, V. (1998.): *Tribologija*. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb
20. Jackson, R.P. (2020.): *Engineering Tribology*. PDH Online Course M427. <https://pdhonline.com/courses/m427/m427content.pdf> (5.06.2023.)
21. Jakovljević, S. (2007.): Utjecaj dvostrukog prevlačenja na mehanička i tribološka svojstva keramičkih prevlaka. Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
22. Jelaska, D. (2005.): *Elementi strojeva*. Skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
23. Jug, D. (2020.): *Obrada tla*. Nastavni materijali, prezentacije. [http://www.opb.com.hr/literatura/OBsK/OBsK-\\_08%20Obrada%20tla.pdf](http://www.opb.com.hr/literatura/OBsK/OBsK-_08%20Obrada%20tla.pdf) (19.05.2023.)
24. Kovač, I. (2007.): *Primjena toplinske obrade čelika u zaštiti od abrazijskog trošenja radnih dijelova alata za obradu tla*. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek

25. Krumes D. (2000.): Toplinska obradba. Udžbenik, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod
26. Krumes D. (2004.): Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina. Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod
27. Leksikografski zavod Miroslav Krleža – LZMK (2018.): Tribologija. Hrvatska tehnička enciklopedija. <https://tehnika.lzmk.hr/tribologija/> (27.05.2023.)
28. Leksikografski zavod Miroslav Krleža – LZMK (2021.): Podmazivanje. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=48917> (28.05.2023.)
29. Li, C-k.; Liu, Y-c; Shi, Y-j.; Yi, P.; Xie, J-h.; Ma, X-l.; Cui, L-f. (2016.): Modeling of High-Frequency Induction Heating Surface Cladding Process: Numerical Simulation, Experimental Measurement and Validation. Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, Atlantis Press, Paris, pp. 747-759
30. Liu J. W.; Zhang, F. X. (2015): Research on Induction Cladding Alloy Layer on the Surface of Steel Parts and its Performance. Advanced Materials Research 1095, pp. 620-625
31. Matijević, B. (2016.): TII i TP – Toplinska obrada. Nastavni materijali – prezentacije. [https://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/04\\_05\\_2017\\_\\_26984\\_TII\\_i\\_PT\\_-TOPLINSKA\\_OBRADA\\_pred\\_1.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/04_05_2017__26984_TII_i_PT_-TOPLINSKA_OBRADA_pred_1.pdf) (9.06.2023.)
32. Milinović, A.; Krumes, D.; Marković, R. (2012.): An investigation of boride layers growth kinetics on carbon steels. Tehnički vjesnik 19, 1(2012), 27-31
33. Miloš, B.; Pintarić, A.; Buljan, G. (1993.): Trošenje abrazijom dijelova poljoprivrednih strojeva. Zbornik radova Savjetovanja „Tribologija u agroindustrijskom kompleksu“, Osijek, 44-48
34. Mulhearn, T.O.; Samuels, L.E. (1962.): The abrasion of metals: a model of the process. Wear 5(6), 478-498
35. Nabertherm (2007.): Thermprozesstechnik II - Nabertherm - PDF Katalog. <https://pdf.directindustry.de/pdf/nabertherm/thermprozesstechnik-ii/16539-459537.html> (20.06.2023.)

36. Pall Corporation (2023.): The Chain Reaction of Wear. Fatigue Wear. <https://www.pall.com/br/pt/industrial-manufacturing/automotive/why-is-filtration-important.html> (20.05.2023.)
37. Pintarić, A. (1988.): Unaprjeđenje poljoprivrednih strojeva s aspekta materijala obzirom na faze eksploatacije i likvidacije. *Strojarstvo*, 30(1988), 5-12
38. Poulka, Ch.V.; Gavrilyuk V.Ya.; Senchishin, V.S. (2014): Improving induction surfacing equipment and technology. *Welding International*, Vol. 28, No. 4, 320–323
39. Purcek, G. (2020.): Basics and Fundamentals of Tribology. Presentation 2020-2021-Spring. <https://avesis.ktu.edu.tr/resume/downloadfile/purcek?key=9b08d7cb-22a2-4111-a3b1-c1790223c080> (28.05.2023.)
40. Rede, V. (2017.): Metalni materijali otporni trošenju. Nastavni materijali – prezentacije. <https://docplayer.gr/92385587-Metalni-materijali-otporni-trosenju.html> (2.06.2023.)
41. Schauerl, Z. (2000.): Utjecaj tvrdoće podloge na trajnost tankih tvrdih prevlaka. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
42. Söhne, W. (1953.): Reibung und Kohäsion bei Ackerboden. *Grundlagen des Landtechnik*, 5/1953., 64-80
43. Strojopromet (2011.): Crna metalurgija, Čelik. <https://strojopromet.com/crna-metalurgija-celik-limovi-sipke-cijevi-profil/> (29.05.2023.)
44. Stupnišek M., Cajner F. (2001.): Osnove toplinske obrade metala. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
45. Stupnišek, M.; Matijević, B. (1998.): Oplemenjivanje alata tvrdim karbidnim slojem. Zbornik radova savjetovanja „Suvremene tehnologije toplinske obradbe čelika“, Zagreb, 41-50
46. Stupnišek, M.; Matijević, B. (2000.): Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala. Zbornik znanstveno-stručnog skupa s međunarodnim učešćem „Toplinska obradba metala i inženjerstvo površina“, Zagreb, 53-62
47. Subramanian, C.; Strafford, K.N. (1993.): Review of multicomponent and multilayer coatings for tribological applications, *Wear* 165(1993), 85-95
48. Traulsen, H.; Holz, W. (1982.): Streifenpflüge in der Praxis. *Landtechnik* 37(1982)6, 288-290

49. Vidaković, I.; Heffer, G.; Grilec, K.; Samardžić, I. (2022.): Resistance of modified material surfaces for agricultural tillage tools to wear by soil particles. *Metalurgija*, Vol. 61, No. 2, 355-358
50. Vujčić, M.; Bilandžić, M.; Vukić, M. (1984.): Trenje, trošenje, podmazivanje i maziva. *Agrotehničar* 20(1984)11, 11-36
51. Westec.al (2015): UTP Welding Guide. Böhler Schweißtechnik, Bad Krozingen, Deutschland. <https://westec.al/wp-content/uploads/2015/03/UTPHandbook.pdf> (23.05.2023.)
52. Xu, M.; Zhu, S.; Ding, H. (2015): Electrical contact strengthening of induction-clad Ni–40% WC composite coatings on 40Cr substrates. *Surface & Coatings Technology* 279, pp. 32-38
53. Yang L.; Li, G. (2011.): Microstructure and Property of Wear-resistant Coating Layer by High-frequency Induction Cladding on Mild Steel Surface. *Advanced Materials Research*, 239-242(2011), pp. 773-776
54. Yu, F.; Liu, J.W.; Ren, L.D.; Wang, D.Q. (2011): Study on Technique of Induction Cladding Alloy Layer in Steel Tube Outer Wall and Property of Alloy Layer. *Advanced Materials Research*, 295-297, pp. 203-207
55. Zhu, F. D.; Zhu, B.J.; Liu, J. (2014.): Research on the Ni-Cr Alloy Coatings on the Hydraulic Prop by High-Frequency Induction Cladding. *Advanced Materials Research*, pp. 1878-1881
56. Zhu, J. F.; Xiao, W.F.; Liu, G.; Wang, S.L. (2013.): The Property Comparison of Coating Prepared by Oxygen-Acetylene Spray Welding Technology and High-Frequency Induction Remelting Technology. *Advanced Materials Research*, 652-654, pp. 1805-1809
57. Zimmer, R.; Banaj, Đ.; Brkić, D.; Košutić, S. (1997.): *Mehanizacija u ratarstvu*. Udžbenik, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek
58. Zimmer, R.; Košutić, S.; Kovačev, I.; Zimmer D. (2014.): *Integralna tehnika obrade tla i sjetve*. Priručnik, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek
59. Zum Gahr, K.-H. (1987.): *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York

## 8. SAŽETAK

Strojevi, uređaji i alati koji se koriste za poljoprivrednu obradu tla izloženi su tijekom eksploatacije različitim oblicima trošenja. Najznačajniji dio sveukupnih oblika trošenja je abrazijsko trošenje materijala česticama tla, a najviše su mu izloženi alati čiji su radni dijelovi tijekom rada u neposrednom dodiru s tlom – plugovi, podrivači, tanjurače, drljače, kultivatori, itd. Negativni učinci navedenog trošenja su promjene u obliku i dimenzijama alata, a posljedice nastalih promjena su slabija funkcionalnost alata u radu (manja dubina i širina oranja itd.), veći troškovi obrade te smanjenje uroda poljoprivrednih kultura, odnosno, u konačnici, povećanje troškova obrade i smanjenje isplativosti poljoprivredne proizvodnje.

Kako bi se smanjili i/ili izbjegli negativni učinci abrazijskog trošenja alata za obradu tla, primjenjuju se različite mjere zaštite radnih površina koje su najizloženije trošenju. Ovaj rad bavi se najvažnijom mjerom takve zaštite – primjenom tvrdih prevlaka, dobivenih različitim tehnološkim postupcima, u zaštiti od trošenja radnih dijelova alata za obradu tla.

Provedenim laboratorijskim istraživanjem (pokusom trošenja) analizirana su svojstva odabranih predstavnika tvrdih prevlaka, ostvarenih različitim tehnološkim postupcima – toplinskim (kaljeni uzorci), toplinsko-kemijskim (borirani uzorci) i postupcima prevlačenja osnovnog materijala drugim materijalom (nataljivanje).

Na temelju dobivenih rezultata istraživanja potvrđeno da se sve vrste ispitivanih tvrdih prevlaka mogu primijeniti u zaštiti alata za obradu tla od abrazijskog trošenja. Također je utvrđeno da se učinkovitost zaštite takvih prevlaka povećava s porastom brzine gibanja alata.

**Ključne riječi:** alati za obradu tla, abrazijsko trošenje, otpornost trošenju, tvrde prevlake

## 9. SUMMARY

Machines, devices and tools used for agricultural tillage are exposed to various forms of wear during exploitation. The most significant part of the overall forms of wear is the abrasive wear of the material by soil particles, and tools whose working parts are in direct contact with the soil during operation are most exposed to it - plows, subsoilers, disc harrows, harrows, cultivators, etc. The negative effects of said wear are changes in the shape and dimensions of the tool, and the consequences of the resulting changes are a weaker functionality of the tool in work (smaller depth and width of plowing, etc.), higher processing costs and a decrease in the yield of agricultural crops, i.e., ultimately, an increase in processing costs and a decrease in the profitability of agricultural production.

In order to reduce and/or avoid the negative effects of abrasive wear of tillage tools, various protection measures are applied to the working surfaces that are most exposed to wear. This paper deals with the most important measure of such protection – the application of hard coatings, obtained by different technological procedures, in the protection against wear of working parts of tillage tools.

The laboratory research (wear test) analyzed the properties of selected representatives of hard coatings, achieved by different technological procedures – thermal (quenched samples), thermal-chemical (borided samples) and procedures of coating the base material with another material (cladding).

Based on the obtained research results, it was confirmed that all types of tested hard coatings can be used to protect tillage tools from abrasive wear. It was also established that the effectiveness of the protection of such coatings increases with the increase in tool speed.

**Key words:** tillage tools, abrasive wear, wear resistance, hard coatings

## 10. POPIS TABLICA

Tablica 1.	Podjela slučajeva trošenja .....	Str. 7
Tablica 2.	Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50320 .....	Str. 8
Tablica 3.	Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije .....	Str. 13
Tablica 4.	Tvrdoće tehničkih materijala .....	Str. 14
Tablica 5.	Utjecajna svojstva područja u sustavu „prevlaka-osnovni materijal“ ....	Str. 15
Tablica 6.	Postupci oplemenjivanja površina .....	Str. 18
Tablica 7.	Kemijski sastav osnovnog materijala C45E .....	Str. 29
Tablica 8.	Kemijski sastav praha UTP HA-7 .....	Str. 31
Tablica 9.	Karakteristike visokofrekventnog generatora .....	Str. 32
Tablica 10.	Kinematski parametri gibanja uzoraka u pokusu trošenja .....	Str. 35
Tablica 11.	Rezultati pokusa trošenja kaljenih uzoraka .....	Str. 37
Tablica 12.	Rezultati pokusa trošenja nataljenih uzoraka .....	Str. 37
Tablica 13.	Rezultati pokusa trošenja boriranih uzoraka .....	Str. 38

## 11. POPIS SLIKA

Slika 1.	Jedinični događaj abrazije .....	Str. 3
Slika 2.	Abrazija u dodiru dva tijela (a) i dodiru tri tijela (b) .....	Str. 4
Slika 3.	Shematski prikaz odnošenja materijala abrazijom .....	Str. 4
Slika 4.	Slučajevi abrazije, ovisno o odnosu tvrdoća abraziva i materijala .....	Str. 5
Slika 5.	Jedinični događaj adhezije .....	Str. 5
Slika 6.	Jedinični događaj umora površine .....	Str. 6
Slika 7.	Jedinični slučaj tribokorozije .....	Str. 6
Slika 8	Shema prolaska plužnoga tijela kroz tlo .....	Str. 9
Slika 9.	Energetska bilanca pogonskog stroja pri oranju .....	Str. 10
Slika 10.	Utjecaj debljine oštrice lemeša na potrošnju goriva (1) i vučni otpor (2) ..	Str. 10
Slika 11.	Razrada procesa trošenja krutog tijela česticama .....	Str. 11
Slika 12.	Tragovi trošenja alata za obradu tla .....	Str. 11
Slika 13.	Područja u sustavu „prevlaka-osnovni materijal“ .....	Str. 15
Slika 14.	Podjela prevlaka prema sastavu i obliku .....	Str. 16
Slika 15.	Orijentacijske vrijednosti tvrdoća površinskih slojeva .....	Str. 20
Slika 16.	Debljine površinskih slojeva otpornih trošenju .....	Str. 21
Slika 17.	Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina .....	Str. 22
Slika 18.	Toplinska obrada u dijagramu „temperatura – vrijeme“ .....	Str. 23
Slika 19.	Dijagram postupka kaljenja .....	Str. 24
Slika 20.	Kutija za boriranje s proizvodima u granulatu .....	Str. 26
Slika 21.	Shema jednofaznog i dvofaznog boridnog sloja .....	Str. 27
Slika 22.	Mikrostruktura čelika u normaliziranom stanju .....	Str. 29
Slika 23.	Mikrostruktura kaljenog uzorka .....	Str. 30
Slika 24.	Uređaj za indukcijsko zagrijavanje .....	Str. 31



Slika 25. Mikrostruktura nataljenog uzorka .....	Str. 32
Slika 26. Mikrostruktura boriranog uzorka .....	Str. 33
Slika 27. Uređaj za pokus trošenja .....	Str. 34
Slika 28. Shema rada uređaja za pokus trošenja i držač uzorka .....	Str. 34
Slika 29. Shema postavljanja ispitnog uzorka .....	Str. 36

## 12. POPIS GRAFIKONA

- Grafikon 1. Gubitci masa uzoraka (trošenje) ispitivanih prevlaka ..... Str. 38
- Grafikon 2. Ovisnost trošenja prevlaka o brzini gibanja uzoraka ..... Str. 39

# 59EMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijek  
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek  
Sveučilišni diplomski studij, smjer Mehanizacija

Diplomski rad

Tvrde prevlake u zaštiti od trošenja alata za obradu tla

Pavle Rašić

## Sažetak:

Strojevi, uređaji i alati koji se koriste za poljoprivrednu obradu tla izloženi su tijekom eksploatacije različitim oblicima trošenja. Najznačajniji dio sveukupnih oblika trošenja je abrazijsko trošenje materijala česticama tla, a najviše su mu izloženi alati čiji su radni dijelovi tijekom rada u neposrednom dodiru s tlom – plugovi, podriivači, tanjurače, drljače, kultivatori, itd. Negativni učinci navedenog trošenja su promjene u obliku i dimenzijama alata, a posljedice nastalih promjena su slabija funkcionalnost alata u radu (manja dubina i širina oranja itd.), veći troškovi obrade te smanjenje uroda poljoprivrednih kultura, odnosno, u konačnici, povećanje troškova obrade i smanjenje isplativosti poljoprivredne proizvodnje. Kako bi se smanjili i/ili izbjegli negativni učinci abrazijskog trošenja alata za obradu tla, primjenjuju se različite mjere zaštite radnih površina koje su najizloženije trošenju. Ovaj rad bavi se najvažnijom mjerom takve zaštite – primjenom tvrdih prevlaka, dobivenih različitim tehnološkim postupcima, u zaštiti od trošenja radnih dijelova alata za obradu tla. Provedenim laboratorijskim istraživanjem (pokusom trošenja) analizirana su svojstva odabranih predstavnika tvrdih prevlaka, ostvarenih različitim tehnološkim postupcima – toplinskim (kaljeni uzorci), toplinsko-kemijskim (borirani uzorci) i postupcima prevlačenja osnovnog materijala drugim materijalom (nataljivanje). Na temelju dobivenih rezultata istraživanja potvrđeno da se sve vrste ispitivanih tvrdih prevlaka mogu primijeniti u zaštiti alata za obradu tla od abrazijskog trošenja. Također je utvrđeno da se učinkovitost zaštite takvih prevlaka povećava s porastom brzine gibanja alata.

**Rad je izrađen pri:** Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

**Mentor:** dr. sc. Ivan Vidaković

**Broj stranica:** 53

**Broj slika:** 29

**Broj tablica:** 13

**Broj grafikona:** 2

**Broj literaturnih navoda:** 59

**Broj priloga:** -

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Ključne riječi:** alati za obradu tla, abrazijsko trošenje, otpornost trošenju, tvrde prevlake

**Datum obrane:**

**Stručno povjerenstvo za obranu:**

1. prof. dr. sc. Goran Heffer, predsjednik
2. dr. sc. Ivan Vidaković, mentor
3. doc. dr.sc. Željko Barač, član

**Rad je pohranjen u:** Knjižnica Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Vladimira Preloga 1.

# BASIC DOCUMENTATION CARD

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek  
Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek  
University Graduate Studies, course Mechanization

Graduate thesis

## Hard coatings in wear protection of tillage tools

Pavle Rašić

### Abstract:

Machines, devices and tools used for agricultural tillage are exposed to various forms of wear during exploitation. The most significant part of the overall forms of wear is the abrasive wear of the material by soil particles, and tools whose working parts are in direct contact with the soil during operation are most exposed to it - plows, subsoilers, disc harrows, harrows, cultivators, etc. The negative effects of said wear are changes in the shape and dimensions of the tool, and the consequences of the resulting changes are a weaker functionality of the tool in work (smaller depth and width of plowing, etc.), higher processing costs and a decrease in the yield of agricultural crops, i.e., ultimately, an increase in processing costs and a decrease in the profitability of agricultural production. In order to reduce and/or avoid the negative effects of abrasive wear of tillage tools, various protection measures are applied to the working surfaces that are most exposed to wear. This paper deals with the most important measure of such protection – the application of hard coatings, obtained by different technological procedures, in the protection against wear of working parts of tillage tools. The laboratory research (wear test) analyzed the properties of selected representatives of hard coatings, achieved by different technological procedures – thermal (quenched samples), thermal-chemical (borided samples) and procedures of coating the base material with another material (cladding). Based on the obtained research results, it was confirmed that all types of tested hard coatings can be used to protect tillage tools from abrasive wear. It was also established that the effectiveness of the protection of such coatings increases with the increase in tool speed.

**Thesis performed at:** Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

**Mentor:** dr. sc. Ivan Vidaković

**Number of pages:** 53

**Number of figures:** 29

**Number of tables:** 13

**Number of graphs:** 2

**Number of references:** 59

**Number of appendices:** -

**Original in:** Croatian

**Key words:** tillage tools, abrasive wear, wear resistance, hard coatings

**Thesis defended on date:**

**Reviewers:**

1. prof. dr. sc. Goran Heffer, president
2. dr.sc. Ivan Vidaković, mentor
3. doc. dr.sc. Željko Barač, member

**Thesis deposited at:** Library, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Vladimira Preloga 1.