

Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja dijelova žitnog kombajna

Božić, Ivica

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:151:124632>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



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

Ivica Božić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

PRIMJENA TVRDIH SLOJEVA U ZAŠTITI OD TROŠENJA
DIJELOVA ŽITNOG KOMBAJNA

Diplomski rad

Osijek, 2023.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Ivica Božić

Diplomski sveučilišni studij Mehanizacija

**PRIMJENA TVRDIH SLOJEVA U ZAŠTITI OD TROŠENJA
DIJELOVA ŽITNOG KOMBAJNA**

Diplomski rad

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. izv. prof. dr. sc. Vjekoslav Tadić, predsjednik
2. prof. dr. sc. Goran Heffer, mentor
3. dr. sc. Ivan Vidaković, član

Osijek, 2023.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TROŠENJE MATERIJALA	2
2.1. Procesi trošenja	2
2.1.1. Abrazija	3
2.1.2. Adhezija	4
2.1.3. Tribokorizija	5
2.1.4. Umor površine	6
2.1.5. Srodni oblici trošenja	7
3. ZAŠTITA OD TROŠENJA IZBOROM MATERIJALA	9
3.1. Zaštita od trošenja oplemenjivanjem površina	10
3.2. Prevlake	13
3.3. Modificiranje površina	14
3.4. Prevlačenje površina	16
4. ŽITNI KOMBAJN	19
4.1. Glavni radni sklopovi žitnog kombajna	20
4.1.1. Uređaj za košnju	21
4.1.2. Vršidbeni uređaj	22
4.1.3. Uređaj za odvajanje zrna od žetvenih ostataka	23
4.1.4. Uređaj za transport zrna iz spremnika do transportnog vozila	25
4.1.5. Uređaj za dodatnu vršidbu neovršenih mahuna	25
4.1.6. Uređaj za obradu žetvenih ostataka	26
5. RADNI DIJELOVI ŽITNOG KOMBAJNA IZLOŽENI TROŠENJU	27
5.1. Trošenje dijelova uređaja za košnju	28
5.2. Trošenje dijelova vršidbenog uređaja	29
5.3. Trošenje dijelova uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka	30
5.4. Trošenje dijelova uređaja za obradu žetvenih ostataka	30
6. TVRDI SLOJEVI U ZAŠTITI OD TROŠENJA DIJELOVA ŽITNOG KOMBAJNA	31
7. ZAKLJUČAK	35

8. POPIS LITERATURE	36
9. SAŽETAK	40
10. SUMMARY	41
11. POPIS TABLICA	42
12. POPIS SLIKA	43
13. POPIS GRAFIKONA	44

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

BASIC DOCUMENTATION CARD

1. UVOD

Tribologija je znanstvena disciplina koja proučava zbivanja na površinama dvaju tijela u dodiru ili relativnom gibanju (triboelementi). Bavi se pronalaženjem mjera primjenom kojih bi se spriječilo ili smanjilo trenje i trošenje materijala u interakciji, tj. postigle se njihove prihvatljive vrijednosti. Te mjere obuhvaćaju izbor materijala triboelemenata, zaštitu površina od trošenja, uhodavanje (početno trošenje) i podmazivanje. Tribologija je interdisciplinarna, jer je zasnovana na osnovnim disciplinama strojarstva (mehanika, mehanika fluida, znanost o materijalima), metalurgije, kemije i fizike (LZMK, 2018.).

Lončarić (2021.) ističe da tribologija predstavlja jednu od najstarijih inženjerskih disciplina i jednu od najmanje razvijenih klasičnih znanosti do danas. Razlog je taj, što tribologija nije doista jedna disciplina, niti je dobro predstavljaju stacionarni procesi. Ona uključuje sve složenosti materijala.

Prema navodima Marković i Milinović (2009.), smanjenje trošenja pomoću modifikacije površine predstavlja jedno od glavnih pravaca triboloških istraživanja u svijetu. Takve tehnologije intenzivno se razvijaju, ali njihova primjena nemoguća je bez poznavanja kemijskih, strukturnih i triboloških karakteristika površinskih slojeva.

Trošenje materijala česticama tla vrlo je izražena pojava kod različitih vrsta strojeva i uređaja čiji radni dijelovi su tijekom eksploatacije u dodiru s tlom. Najčešće su to dijelovi poljoprivredne, građevinske ili rudarske mehanizacije (Heffer i sur., 1998.).

Prema Vidakoviću i sur. (2022.), jedno od najvažnijih mjesta u poljoprivrednoj proizvodnji zauzima obrada tla. Strojevi koji se pritom koriste izloženi su različitim oblicima trošenja, uglavnom uzrokovanim kretanjem njihovih radnih dijelova (plugovi, podrivači, tanjurače, drljače, kultivatori i dr.) kroz masu obradivog tla. Takav tribološki sustav je vrlo složen, pa je interakcija između radnih dijelova i tla kompliciran tribološki problem. U okviru takvog sustava najznačajniji dio ukupnih oblika trošenja je abrazijsko trošenje zbog prisutnosti tvrdih abrazijskih čestica u tlu. Glavni abrazijski elementi u većini tala su kamenje i šljunak, a osim abrazije, proces trošenja uključuje udar, struganje i kemijsko djelovanje.

Budući da su u poljoprivrednoj mehanizaciji zastupljeni različiti tipovi strojeva, pa tako i žitni kombajni, koji su tijekom svog rada izloženi trošenju, u ovom radu opisano je trošenje odabranih primjera radnih dijelova kombajna te mogućnosti prevlačenja njihovih površina, primjenom tvrdih slojeva, u svrhu povećanja otpornosti na trošenje.

2. TROŠENJE MATERIJALA

Jackson (2020.) navodi da je trošenje progresivno oštećenje, koje uključuje gubitak materijala, koje se događa na površini komponente kao rezultat njezinog gibanja u odnosu na susjedne radne dijelove. Trošenje je gotovo neizbježan pratilac trenja.

Prema Purceku (2020.), trošenje je površinsko oštećenje ili uklanjanje materijala s jedne ili obje od dviju čvrstih površina u klizanju, kotrljanju ili udarnom gibanju jedne u odnosu na drugu.

Trošenje započinje jednim od mehanizama, a nastavlja se drugim. Pri tome svi mehanizmi osim zamora, pojavljuju se uz postupno odstranjenje materijala. Čvrste površine koje su u dodiru se oštećuju ili dolazi do odstranjivanja materijala sa jedne ili obje strane prilikom njihova gibanja. Trošenje materijala može se podijeliti na poželjno ili nepoželjno trošenje. Nepoželjno trošenje je u strojnim primjenama kod brtvila, ležajeva, nazubljenih alata, a poželjno trošenje predstavlja obradu odvajanjem strugotina, poliranje, pisanje olovkom (Kovačević i Vrsaljko, 2011.).

Ivušić (1998.) navodi da su posljedice trošenje promjene geometrije površine uzajamno pokretnih dijelova materijala. Pomoću istraživanja utvrđeno je da je preko 50 posto zastoja strojarskih sustava izazvano trošenjem strojarskih pokretnih sklopova.

2.1. Procesi trošenja

Procesi trošenja odvijaju se u okviru sustava koji se nazivaju tribosustavi, a to su svi oni kod kojih postoji relativno gibanje između pojedinih dijelova. Postoje različiti oblici trošenja, kao posljedica raznovrsnosti uvjeta kontakata (stanje površine, način i brzina relativnog gibanja, temperatura, itd.), tako da otpornost trošenju ne predstavlja jedinstveno svojstvo već naziv za skupinu svojstava (Ivušić, 1998.).

Njemački standard DIN 50320 (1979.), koji definira temeljne pojmove u području trošenja i sustavnu analizu procesa trošenja, te klasificira slučajeve trošenja, utvrdio je četiri osnovna mehanizma trošenja. To su:

1. abrazija
2. adhezija
3. umor površine

4. tribokorozija

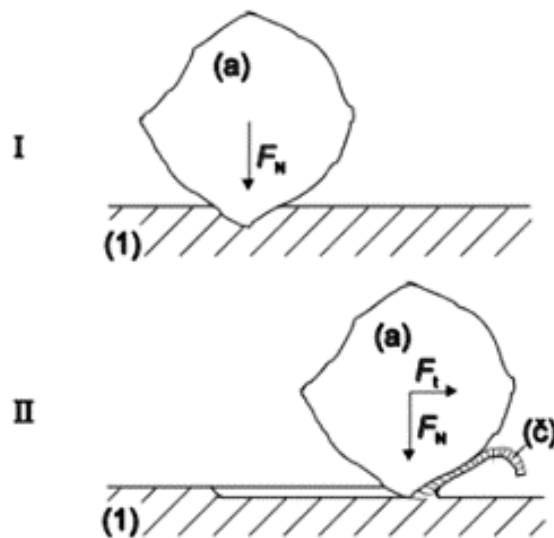
Osim procesa trošenja koji nastaju kao posljedica osnovnih mehanizama trošenja, postoje i srodni oblici trošenja materijala:

- erozija
- korozija
- kavitacija

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 (Grilec i sur., 2015.).

2.1.1. Abrazija

Abrazija predstavlja trošenje istiskivanjem materijala, koje je uzrokovano tvrdim česticama ili izbočinama. Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze: prva faza abrazije je prodiranje abraziva u površinu materijala pod utjecam normalne sile F_n , a druga faza je istiskivanjem materijala u obliku čestice trošenja na koju djeluje tangencijalna sila F_t , kao što je prikazano slikom 1. (Ivušić, 1998.).



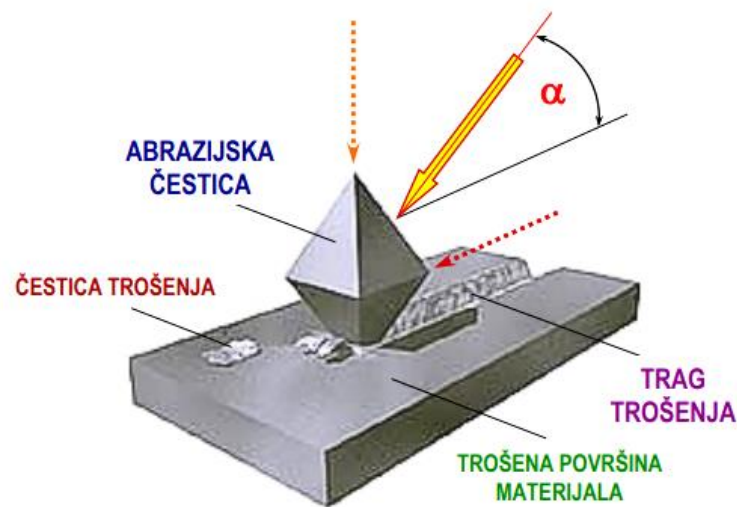
Slika 1. Jedinični događaj abrazije (Izvor: Ivušić, 1998.)

Prema Grilec i sur. (2015.), abrazija se može promatrati s nekoliko gledišta:

- Ovisno o strukturi tribosustava – abrazija u dodiru dva tijela i abrazija u dodiru tri tijela;

- Ovisno o međudjelovanju površine i čestice – mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikroumor i mikronaprnuća;
- Ovisno o odnosu tvrdoća materijala i abraziva (selektivna, “nulta” i “čista” abrazija).

Heffer (2002.) navodi da teorijski model abrazije odgovara modelu mikrorezanja, tj. odvajanja čestica trošenja u mikropodručju, pri čemu se u razmatranju često koristi shematski prikaz mikrorezanja vrhom pravilne četverostrane piramide koja pod određenim kutom prodire u površinu trošenog materijala. Što je pritom tvrdoća vrha piramide veća od tvrdoće površine trošenog materijala, to će biti izraženiji trag trošenja na površini, kako je prikazano na slici 2.

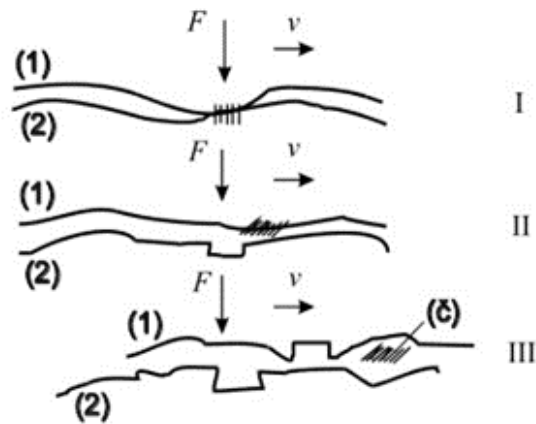


Slika 2. Teorijski model abrazije (Izvor: Heffer, 2002.)

2.1.2. Adhezija

Grilec i sur. (2015.) navode da je kod adhezije karakterističan prijelaz materijala s jedne klizne površine na drugu zbog procesa zavarivanja krutih faza, uslijed relativnog gibanja kliznih površina. Događaj se opisuje u tri faze, prikazane slikom 3.:

- Prva faza predstavlja nastajanje adhezijskog spoja na mjestu dodira izbočina;
- Druga faza se odnosi na raskidanje adhezijskog spoja;
- Treća faza kidanje čestice trošenja.



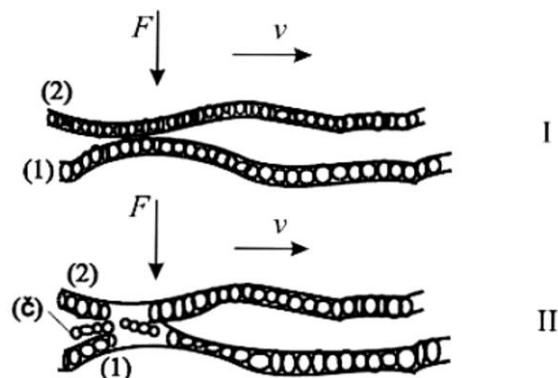
Slika 3. Jedinični događaj adhezije (Izvor: Grilec i sur., 2015.)

Ivušić, (1998.) navodi da čestice mogu privremeno ili trajno ostati nalijepljene na površinu. Otpornost kliznog para na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti tarnog para stvaranju zavarenih spojeva. Materijali koji nisu u paru nemaju sklonost mikrozavarivanju, te su tribološki kompatibilni.

2.1.3. Tribokorozija

Đurkić (2018.) navodi da je tribokorozija ili tribokemijsko trošenje materijala mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolinom. Jedinični događaj tribokorozije se u dvije faze, prikazane na slici 4.:

1. faza I – Stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkta korozije;
2. faza II – Mjestimično razaranje sloja produkata korozije.



Slika 4. Jedinični događaj tribokorozije (Izvor: Radić, 2021.)

Izgled površina izloženih tribokoroziji ovisi o intenzivnosti odnošenja stvorenih čestica trošenja. Pri maloj intenzivnosti na površini se pojavljuju proizvodi korozije, a kod veće

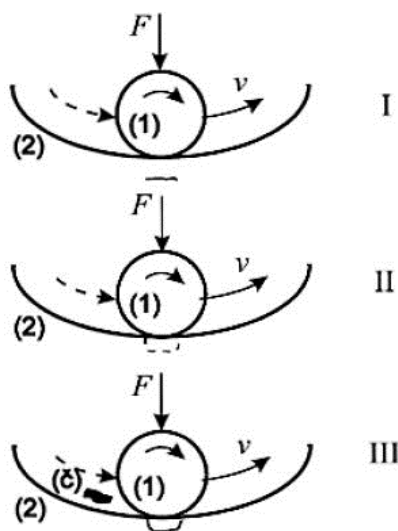
intenzivnosti odnošenja površina je naizgled polirana. Čestice su trošenja praškastog oblika, uglavnom oksidne. Tribokorozija se ubraja u osnovne mehanizme trošenja, ali to je ipak kombinacija između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od osnovnih elemenata trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine (Janješić, 2019.).

2.1.4. Umor površine

Kovačević i Vrsaljko (2011.) navode da se umor površine i unutrašnjosti materijala javlja za vrijeme cikličkih promjena naprezanja, poput ponovljenog kotrljanja, ponovljenog klizanja i sl. Ponovljeni ciklusi opterećenja i rasterećenja, kojima je materijal izložen, mogu izazvati stvaranje potpovršinskih i površinskih pukotina. Nakon određenog broja ciklusa, pukotine mogu rezultirati prekidom površine i stvaranjem velikih fragmenata ili jama (pitting). Najrelevantniji je faktor za procjenu trošenja zamorom materijala broj ciklusa ili vrijeme prije nego što se dogodi popuštanje zamorom materijala

Prema Đurkiću (2018.), jedinični događaj umora površine odvija se u tri faze, slika 5.:

1. faza I – Stvaranje mikropukotine ispod površine izložene trošenju;
2. faza II – Napredovanje mikropukotine ispod površine;
3. faza III – Ispadanje čestice trošenja.

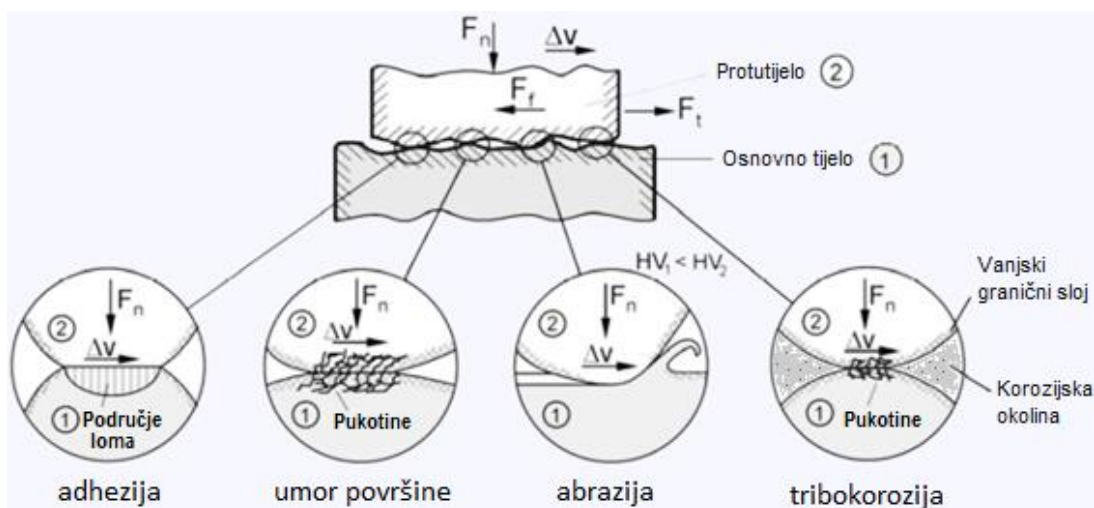


Slika 5. Jedinični događaj umora površine (Izvor: Đurkić, 2018.)

Razlikuju se dva tipa mehanizma trošenja umorom površine: umor visokog ciklusa i umor niskog ciklusa. Pri umoru površine visokog ciklusa, broj ciklusa prije kvara je veliki, tako da je vijek komponente relativno dug. Pukotine u ovom slučaju nastaju zbog postojećih mikrodefekata u materijalu, blizu kojih lokalni stres može premašiti vrijednost iskorištenja,

iako je nominalno makroskopski kontakt u elastičnom režimu. Pri umoru površine niskog ciklusa, broj ciklusa prije kvara je relativno mali, tako da komponenta brzo propadne. U ovom slučaju inducira se plastičnost svakog ciklusa, a čestica trošenja se generira tijekom akumuliranih ciklusa. U prvim ciklusima ne nastaju ostatci trošenja, već se stvaraju samo plitki utori uslijed plastične deformacije. Nakon kritičnog broja ciklusa, plastična deformacija prelazi kritičnu vrijednost i dolazi do loma materijala (Janješić, 2019.).

Budući da su osnovni mehanizmi trošenja vrlo često pomiješani u različitim realnim procesima trošenja materijala, pri čemu dva ili više mehanizama mogu djelovati istovremeno u jednom procesu trošenja, ili trošenje može započeti jednim od mehanizama, a nastaviti se drugim, kako su to naznačili Kovačević i Vrsaljko (2011.), na slici 6. prikazana je usporedba osnovnih mehanizama u jednom tribosustavu.



Slika 6. Usporedba osnovnih mehanizama trošenja (Kolumbić i Dunder, 2011.)

2.1.5. Srodni oblici trošenja

Erozija je vrsta trošenja koja nastaje uslijed djelovanja djelića fluida (sa ili bez krutih čestica nošenih fluidom) koji velikim brzinama udaraju o površinu tijela. Jačina erozije najviše ovisi o brzini i kutu udara čestica, te njihovoj tvrdoći. Erozija, prikazana na slici 7.a, zapravo spada u područje abrazivnog trošenja. Neki od načina smanjenja erozije su (Đurkiću, 2018.):

- Eliminacija krutih čestica iz fluida,
- Promjena kuta udara fluida o površinu,
- Smanjenje relativne brzine fluida,
- Izbor pogodnog materijala,

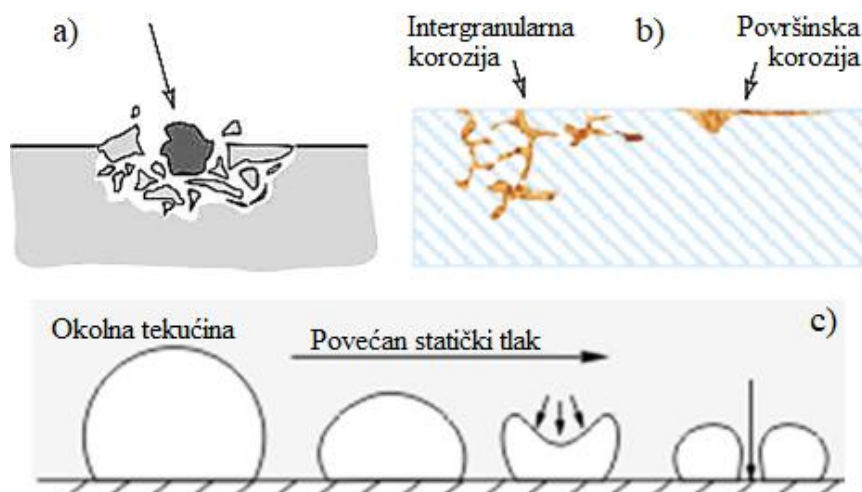
- Dodatne izmjene površine materijala u cilju poboljšanja njegovih karakteristika.

Korozija je proces nenamjernog razaranja konstrukcijskih materijala, uzrokovan fizikalnim, kemijskim i biološkim agensima. Budući da je područje korozije vrlo široko i raznovrsno, postoji više različitih podjela korozije:

- Prema mehanizmu djelovanja – kemijska i elektrokemijska korozija;
- Prema izgledu korozijskog napada – jednolika (opća) korozija i lokalizirana korozija (pjegasta, jamasta, točkasta ili jamičasta, interkristalna, transkristalna i dr.)
- Prema korozijskim sredinama – atmosferska korozija, korozija u tlu, korozija u elektrolitima i neelektrolitima;
- Posebni oblici korozije – kontaktna korozija, korozija zbog lutajućih struja, korozija u procijepu, korozija uz naprezanje, korozijsko raspucavanje uz naprezanje, korozijski zamor, erozijska korozija, biokorozija i dr.

Sama korozija, prikazana na slici 7.b, je elektrolitički proces koji uključuje izmjenu elektrona i iona. Može se pojaviti između različitih metala ili između različitih dijelova istog metala ili slitine, gdje postoji razlika elektrokemijskog potencijala. Razlika nastaje i zbog prisustva oksida, različitih nečistoća, faza slitine (Drčec, 2010.).

Kavitacija, prikazana na slici 7.c, uključuje oštećenje površine materijala, uronjenog u tekućinu, zbog udara mjehurića isparene tekućine u površinu. Kavitacijsko trošenje je, ustvari, podvrsta tribokorozijskog trošenja. Javlja se kada se tlak u tekućini snizi na vrijednost tlaka isparavanja te dolazi do pojave mjehurića pare. Oni bivaju nošeni u područje višeg tlaka gdje implodiraju (vraćaju se u kapljevitu fazu). Ako se implodija mjehurića pare događa u blizini čvrste stijenke, dolazi do njenog oštećenja. Sama pojava popraćena je vibracijama i bukom (Žnidarec, 2009.).



Slika 7. Srodni oblici trošenja (Izvor: Janješić, 2019.)

3. ZAŠTITA OD TROŠENJA IZBOROM MATERIJALA

Zaštita površina dijelova izloženih trošenju provodi se pravilnim izborom materijala koji ima izraženu otpornost na određeni mehanizam trošenja. Budući da se u više od polovine slučajeva trošenja radi o abraziji, te da je riječ o najintenzivnijem obliku trošenja, izbor materijala se obavlja prema uputama prikazanim u tablici 1.

Tablica 1. Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije (Izvor: Ivušić, 1998.)

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

Prema provedenim istraživanjima, jedno od najvažnijih svojstava u definiranju materijala otpornog na abraziju je njegova tvrdoća. U tablici 2. prikazani su podatci o tvrdoći materijala koji se u praktičnoj primjeni mogu naći u različitim oblicima.

Tablica 2. Tvrdoće tehničkih materijala (Izvor: Poretti, 2008.)

Materijal	Tvrdoća (HV)	Napomena
Dijamant	7000	Industrijski dijamant
Borov nitrid (BN)	4500	BN – kubična kristalna rešetka
Rubin	4000	Sintetirani
Oksidni tvrdi materijal	1600 do 4000	Rezna keramika
Titanov karbid (TiC)	3600	
Korund (Al ₂ O ₃)	3000	Sintetirani
Ti i Al-nitrid (TiAl)N	2800	
Widia - sintetirana	1400 do 2500	Karbidni tvrdi materijal
Siciljev karbid (SiC)	2400	
Widia - lijevana	1800 do 2300	Satelit
Nitirani čelik	1200	
Kaljani čelik	1000	
Mekani čelik	90	

3.1. Zaštita od trošenja oplemenjivanjem površina

Ivušić (1998.) navodi da je oplemenjivanje površina najvažniji način prevladavanja proturječnih zahtjeva na materijal triboelemenata. Pri tome osnovni materijal ispunjava zahtjeve u pogledu tehnološkičnosti i cjelovitosti triboelemenata, a oplemenjena površina ispunjava tribološke zahtjeve. Oplemenjivanjem površina u svrhu povećanja zaštita od trošenja bavi se znanstveno-stručna disciplina Inženjerstvo površina, koja je danas najaktivnije područje tribološkog djelovanja. Brojnost vrsta postupaka oplemenjivanja površina ilustrirana je tablicom 3.

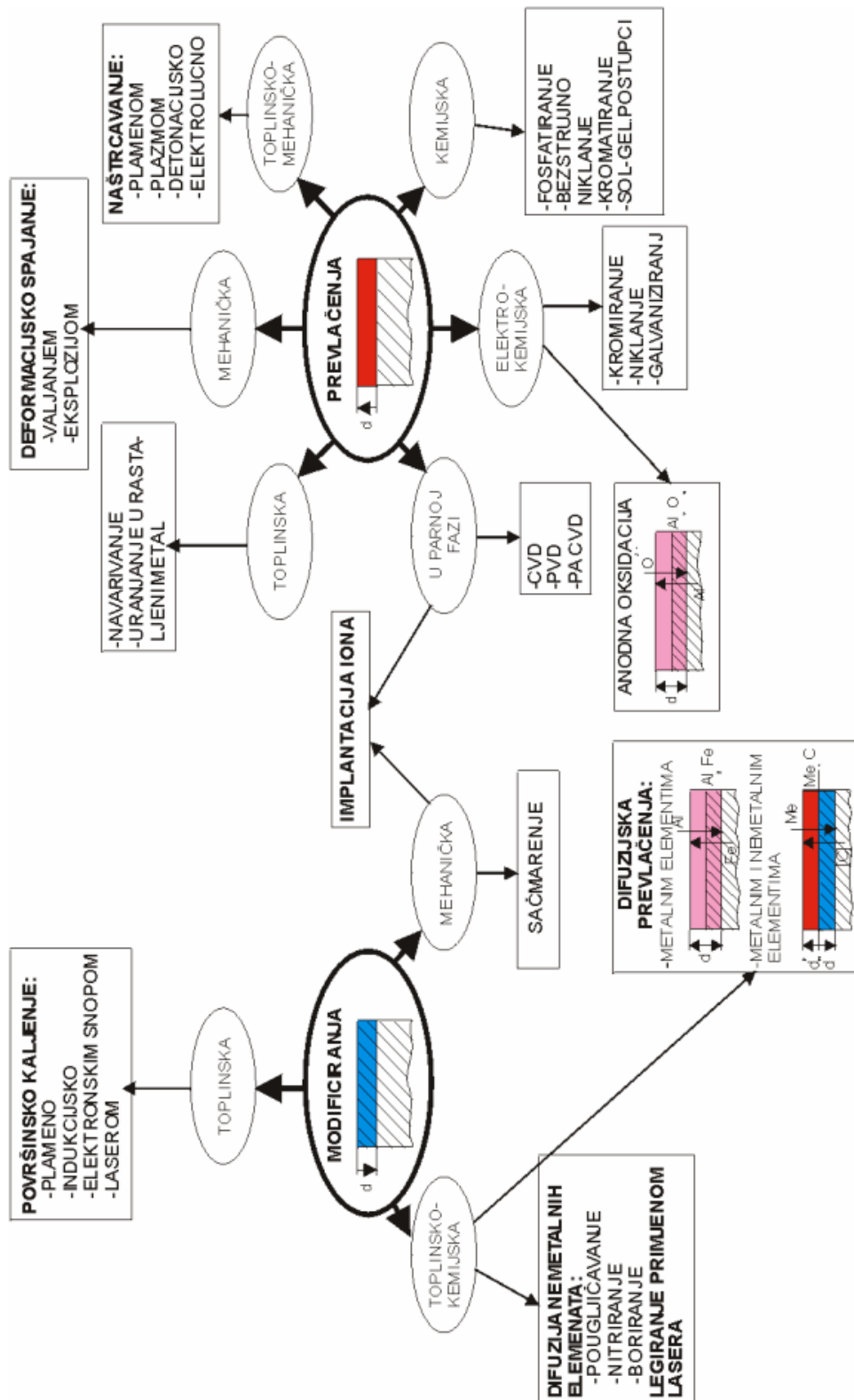
Jedna od općeprihvaćenih definicija discipline Inženjerstva površina glasi: Inženjerstvo površina sadržava primjenu tradicionalnih i inovativnih površinskih tehnologija u cilju “konstruiranja” sustava: površinski sloj – osnovni materijal (substrat), kao kompozitnog materijala sa svojstvima koja ne može dati niti sam osnovni materijal niti sam površinski sloj, a ta svojstva moraju jamčiti dobre eksploatacijske karakteristika uz prihvatljive proizvodne troškove (HDMT, 1993.).

Prema Grilecu i sur. (2015.), oplemenjivanje površina sastoji se od velikog broja postupaka i njihovih različitih varijanti. Stoga je prema temeljnim fizikalnim i kemijskim zakonitostima procesa, izvršena podjela postupaka oplemenjivanja, prikazana u tablici 3.

Tablica 3. Postupci oplemenjivanja površina (Izvor: Ivušić, 1998.)

I VRSTA Nanošenje druge vrste materijala		II VRSTA Promjena sastava na površini	III VRSTA 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 obradba</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 obradba</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 obradba</u> J1 Nagrizanje J2 Oksidiranje	M. <u>Termomehanička obradba</u> M1 Martensitno deformacijsko otvrdnjavanje
D. <u>Mješovito</u> D1 Otvrdnjavanje iskrenjem D2 Prevlačenje praškom D3 Organske prevlake D4 Bojanje D5 Vruće uranjanje			

Stupnišek i Matijević (2000.) navode da svojstva površinskih slojeva strojnih dijelova i alata vrlo često određuju njihovu vrijednost, jer ona presudno utječu na trajnost u eksploataciji, a time i na ekonomičnost primjene. Iz tog se razloga posvećuje sve veća pažnja inženjerstvu površina i tehnologijama površina. U industrijski razvijenim zemljama tehnologije površina označavaju 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 obradbe površina, prikazanu slikom 8.



Slika 8. Pregled postupaka modifikiranja i prevlačenja površina

(Izvor: Stupnišek i Matijević, 2000.)

Površinski slojevi razlikuju se od osnovnog obrađivanog materijala u pogledu kemijskog sastava, mikrostrukture, kristalne rešetke i drugih fizikalnih i kemijskih svojstava, kojima se

ostvaruju različita eksploatacijska svojstva. Modificiranje i prevlačenje površina može se provesti mehaničkim, toplinskim, kemijskim i elektrokemijskim procesima kao i kombinacijom dva ili više procesa. Osim toga, niti osnovnu podjelu postupaka nije moguće primijeniti kod graničnih slučajeva, kod kojih su prisutni elementi karakteristični za obje skupine. Također, primjenjuju se i tzv. duplex postupci koji uključuju dvije vrste postupaka u slijedu (Stupnišek i Matijević, 2000.).

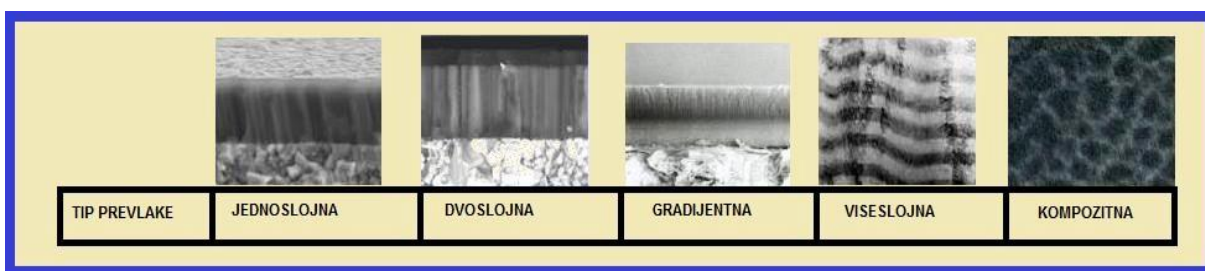
3.2. Prevlake

Prevlaka se definira kao sloj materijala koji je prirodnim ili umjetnim putem stvoren na površini ili je nanešen nekim postupkom na strukturno različiti osnovni material u svrhu ispunjavanja odgovarajućih tehnoloških i dekorativnih svojstava (Razum, 2014.).

Kada se govori o tribološkim prevlakama, odnosno o prevlakama u uvjetima povećanog trošenja, za inženjere je najvažnije ispunjavanje triboloških zahtjeva. Prema tome, može se reći da su tribološke prevlake dovoljno tanki slojevi nanešeni na osnovni material, u kojemu oni preuzimaju zaštitu od trenja i trošenja, tj. ponašaju se kao osnovni materijal (Titan Sisak, 2012.).

Prema Poloviću (2015.), idealne prevlake moraju ispuniti zahtjeve poput dobre prionjivosti na osnovni materijal, dovoljnu tvrdoću zbog otpornosti na abraziju, dovoljnu žilavost radi sprječavanja ljuštenja, dobru kemijsku postojanost, te prilagođenost podlozi.

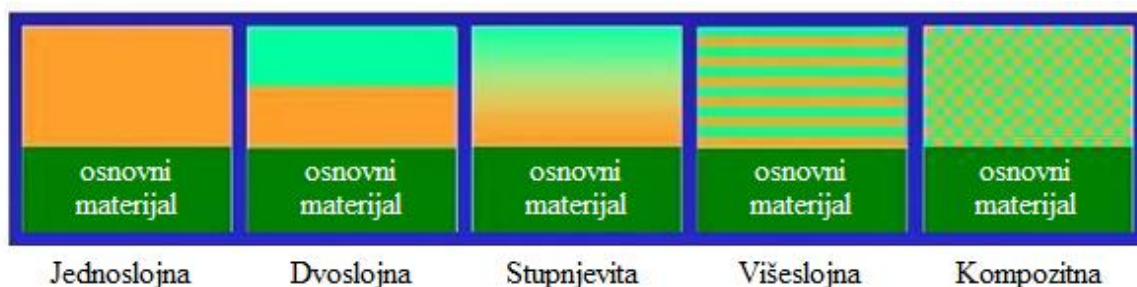
Macura (2016.) je prikazao izgled nekih od prevlaka pod mikroskopom, podjelivši ih pritom na nekoliko tipova, kao što se vidi na slici 9.



Slika 9. Izgled različitih tipova prevlaka pod mikroskopom (Izvor: Macura, 2016.)

Grilec i sur. (2015.) navode da se, prema sastavu i obliku, tribološke prevlake mogu se podijeliti na jednokomponentne, višekomponentne (legirane), višeslojne, stupnjevite, kompozitne i višefazne.

Različite vrste prevlaka grafički su prikazane na slici 10.



Slika 10. Grafički prikaz različitih vrsta prevlaka (Izvor: Polović, 2018.)

Prema tipu kemijskih veza mogu se razlikovati tri osnovne skupine prevlaka: prevlake s metalnom vezom, prevlake s ionskom vezom i prevlake s kovalentnom vezom (Grilec i sur., 2015.).

Prethodni autori navode da se, prema tvrdoći, tribološke prevlake dijele na meke i tvrde. Namjena mekih triboloških prevlaka je smanjenje trenja klizanja, što se postiže njihovim nanošenjem na tvrdi podlogu. Prema vrsti materijala meke prevlake mogu se svrstati u polimerne prevlake, lamelarne krute prevlake i prevlake od mekanih metala. Prevlake velike tvrdoće povećavaju otpornost prodiranju stranih čestica u osnovni materijal te su zbog toga pogodne za primjenu u uvjetima abrazijskog i erozijskog trošenja. Prema vrsti materijala tvrde tribološke prevlake mogu se podijeliti na nitridne, karbidne, oksidne, boridne i tvrde ugljične prevlake (dijamantne, engl. *diamond like carbon* – *DLC*). Također, različiti karbidi, nitridi, oksidi i boridi koji se mogu koristiti kao višekomponentne prevlake, za poboljšavanje otpornosti na trošenje.

U daljnjem se daju detaljniji opisi postupaka modificiranja i prevlačenja površina, prema shemi prikazanoj na slici 8.

3.3. Modificiranje površina

Primjenom postupaka modificiranja mogu se postići značajno drugačija svojstva površine obrađenog materijala u odnosu na jezgru, prije svega to se odnosi na povišenje tvrdoće i otpornosti na trošenje, povećanje otpornosti na koroziju i smanjenje faktora trenja. Na taj način značajno se povećava vijek trajanja obrađivanog proizvoda. Modificiranje površinskih slojeva metalnih materijala može se provesti primjenom postupaka koji se u osnovi razlikuju prema vanjskom djelovanju, a mogu biti mehanički, toplinski ili toplinsko-kemijski. Kod

postupaka modificiranja površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti materijala (Mateša, 2019.).

Mehaničko modificiranje definira se kao mehaničko unošenje tlačnih napetosti u površinski sloj metalnog materijala u kojem se promjene poput pomicanja i umnožavanja dislokacija odvijaju u kristalnoj rešetci, a sve to pridonosi povećanju otpornosti same površine. Također, ova vrsta modifikacije provodi se postupcima kontroliranog sačmarenja površina konstrukcijskih dijelova, i to najčešće zupčanika, s ciljem dodatnog povećanja nosivosti boka zuba, ali i povišenja dinamičke izdržljivosti zupčanika (Giber, 2020.).

Toplinsko modificiranje provodi se unošenjem toplinske energije u površinski sloj strojnog dijela čime se omogućava površinsko kaljenje. Postupci površinskog kaljenja se mogu podijeliti na: plameno kaljenje, indukcijsko kaljenje, kaljenje elektronskim snopom i kaljenje laserom. U slučaju visoke gustoće unesene energije i kratkim trajanjima, ugrijavanje se ograničuje samo na površinski sloj materijala. Kod navedenih postupaka toplinskog modificiranja površine dubina ugrijavanja i zakaljivanja može biti puno manja, pa u tim slučajevima postoji mogućnost samozakaljivanja, to jest odvođenja topline iz tankog austenitiziranog sloja u unutrašnjost ispod sloja, bez potrebe za primjenom vanjskog sredstva za hlađenje (gašenjem). Najpogodniji materijali za površinsko kaljenje su konstrukcijski čelici za poboljšavanje i željezni ljevovi (sivi i nodularni) s perlitnom osnovom u kojoj se nalazi dovoljno vezanog ugljika (Vukes, 2021.).

Toplinsko-kemijsko modificiranje, prema Stupnišku i Matijeviću (2000.), obuhvaća postupke u kojima se, osim unosa toplinske energije, unošenjem drugih kemijskih elemenata mijenja kemijski sastav, a time i mikrostruktura i svojstva površinskih slojeva. Nemetalni se elementi mehanizmom difuzije unose u površinski sloj metalnog materijala. U industriji strojogradnje puno se primjenjuju postupci pougljičavanja, nitriranja te kombinirani postupci istovremene difuzije ugljika i dušika (karbonitriranje i nitrokarburiranje), kao i varijante sa sumporom ili s kisikom.

- Pougljičavanje se provodi u sklopu cjelovitog postupka cementiranja kojim se postiže visoka otpornost na umor površine kod čelika za cementiranje. U primjeni je veliki broj postupaka pougljičavanja, od primjene posebnih granulata, solnih kupki i plinskih atmosfera (generatorskih, sintetičkih, ioniziranih). Premda je pougljičavanje najstariji princip toplinsko-kemijske obrade čelika, ipak mu je i sada veoma raširena primjena, jer se postižu najviše otpornosti u uvjetima naprezanja površinskih slojeva pri umoru površine. Kod nekih vrsta strojnih elemenata cementiranje je skoro

nezamjenjivo u uvjetima visokih specifičnih tlakova, na primjer kod zupčanika za prijenos snage. Prisutan je stalan razvoj tehnologija pougljičavanja – primjenjuju se senzori za kontrolu plinskih atmosfera i matematički modeli, te programi za upravljanje procesima u cilju postizanja optimalnih profila koncentracija ugljika i mikrostrukture u cementiranom površinskom sloju čeličnih dijelova.

- Postupci nitriranja također su u širokoj primjeni. Postoji veliki broj postupaka i tehnologija u solnim kupkama, plinskim i ioniziranim atmosferama. Najčešće se osim dušika u površinski sloj istovremeno uvode i drugi nemetalni elementi (C, O, S), tako da su to postupci nitrokarburiranja, nitrooksikarburiranja, sulfonitriranja i dr. U površinskom sloju čelika postiže se relativno tanka “zona spojeva” nitrida, odnosno karbonitrida, koja daje visoku otpornost površine prema adhezijskom trošenju. Ispod zone spojeva je difuzijska zona u kojoj je dušik otopljen u feritu što doprinosi povećanju otpornosti na umor površine. Nitrirani sloj također ima i povećanu otpornost prema koroziji. U primjeni su postupci dodatne obrade u solnim kupkama i u plinskim atmosferama.
- Postupci karbonitriranja (istovremena difuzija ugljika i dušika) relativno malo se primjenjuju u industrijskoj praksi, premda oni daju svojstva koja sadrže pozitivne karakteristike pougljičavanja (cementiranja) i nitriranja. Postoje postupci visokotemperaturnog karbonitriranja (s promjenom mikrostrukture u jezgri) i postupci niskotemperaturnog karbonitriranja (bez promjene mikrostrukture u jezgri).
- Postupci boriranja također spadaju u postupke toplinsko-kemijskog modificiranja, budući da se njima, pri povišenim temperaturama, postižu veoma tvrdi slojevi borida koji imaju visoku otpornost prema abrazijskom trošenju. Premda se radi o postupcima koji ne zahtijevaju velika ulaganja, oni nisu našli široku primjenu u praksi.
- U skupinu toplinsko kemijskog modificiranja spadaju i postupci površinskog legiranja primjenom lasera. To su novi postupci koji obećavaju velike mogućnosti, međutim, njihova primjena nije široka, vjerojatno zbog visokih troškova opreme.

3.4. Prevlačenje površina

Prevlačenjem površina se na osnovni materijal nanosi prevlaka određene debljine, koja mu mijenja dimenzije, ali u većini slučajeva služi kao zaštitni sloj (Cindrić, 2020.).

Različiti postupci prevlačenja mogu se, prema temeljnom mehanizmu (toplinski, mehanički, kemijski ili u kombinaciji), svrstati u više podskupina (Grilec i sur., 2015.).

Toplinska prevlačenja karakterizira površinski sloj koji nastaje primjenom topline za rastaljivanje metalnog materijala, koji potom kristalizira na površini obrađivanog osnovnog metalnog materijala. Tako se nanose metalni slojevi postupcima navarivanja i postupcima uranjanja u rastaljeni metal. Navarivanja se provode u cilju povećanja otpornosti na trošenje kao i za povećanje otpornosti prema kemijskom utjecaju. Obično su to deblji slojevi širokog polja tolerancija dimenzija i koji se nakon istrošenja mogu regeneracijom obnoviti. Uranjanje u rastaljeni metal (nižeg tališta od čelika, na primjer Zn, Pb) primjenjuje se uglavnom za povećanje otpornosti prema koroziji i kemijskom djelovanju (Tadić, 2015.).

Mehanička prevlačenja izvodi se mehaničkim djelovanjem na materijal, čime se ostvaruje deformacijsko spajanje različitih metalnih materijala koji imaju bitno različita svojstva, najčešće otpornost prema kemijskom djelovanju. U ove postupke uključeni su:

- valjanje (engl. *roll bonding*)
- eksplozijsko spajanje (engl. *explosive cladding, explosive bonding*)

Postupak valjanja primjenjuje se uglavnom za povećanje otpornosti na koroziju čeličnih limova, prevlačenjem prevlakama od nehrđajućeg čelika, bakra ili aluminija. Kod ovog postupka lim i materijal prevlake valjaju se između valjaka za prevlačenje, pri čemu uslijed velikog pritiska dolazi do vezanja prevlake za podlogu (Grilec i sur., 2015.).

Toplinsko-mehaničko prevlačenje izvodi se toplinskom energijom, pri čemu se rastali dodatni materijal, a rastaljene čestice mehaničkim udarom usmjeravaju na površinu obrađivanog predmeta te tamo kristaliziraju. Različitim postupcima naštrcavanja (plamenom, plazmom, detonacijski, elektrolučno) nanose se različiti metali, legure i mješavine s keramičkim materijalima u cilju povećanja otpornosti na trošenje, ali i u cilju povećanja otpornosti prema kemijskom djelovanju. U odnosu na navarivanje, naštrcavanjem se nanose tanji slojevi jednolike debljine, a moguće ih je također naknadno obnavljati. Izbor odgovarajućeg postupka ovisi o zahtijevanim značajkama slojeva (gustoća, prianjanje, debljina sloja, tvrdoća itd.), dijelovima koji se prevlače (geometrija, troškovi, površina koja se prevlači, osnovni materijal), rubnim uvjetima, te mjestu izvođenja postupka prevlačenja (u radionici ili na licu mjesta). Pojedini postupci razlikuju se prema primijenjenoj vrsti energije, prema toplinskoj i kinetičkoj energiji i postizivim kvalitetama sloja. Svaki postupak ima svoje područje primjene te se oni međusobno nadopunjuju (Cindrić, 2020.).

Kemijsko prevlačenje primjenjuje se uglavnom radi povećanja otpornosti prema koroziji i kemijskom djelovanju. Ono obuhvaća postupke fosfatiranja, bezstrujnog niklanja, kromatiranja i sol-gel postupci. Neke vrste tako dobivenih površinskih slojeva imaju, osim povišene otpornosti prema koroziji, i povišenu otpornost na trošenje. Tako se na primjer postupkom bezstrujnog niklanja postižu tvrdoće oko 500 HV radi otopljenog fosfora u niklu. Dodatnom toplinskom obradom dozrijevanja (starenja) pri temperaturama oko 400 °C postiže se povećanje tvrdoće do oko 1000 HV, radi povoljnog djelovanja izlučenih precipitata niklova fosfida na otežavanje gibanja dislokacija (Stupnišek i Matijević, 2000.).

Elektrokemijsko prevlačenje uglavnom se primjenjuje u cilju povećanja otpornosti na koroziju i kemijsko djelovanje. U navedene postupke spadaju:

- kromiranje (engl. *chrom plating*)
- niklanje (engl. *nickel plating*)
- galvaniziranje (engl. *galvanizing*)

Kromirani površinski slojevi imaju pored visoke otpornosti na koroziju i povišenu tvrdoću i otpornost na trošenje ("tvrdi krom"). Lokalno nanoseni slojevi mogu se obnavljati nakon istrošenja (Grilec i sur., 2015.).

Prevlačenje u parnoj fazi (engl. *vapour deposition*) obuhvaća postupke koji se sve više koriste s ciljem povećanja otpornosti površina na trošenje. Uz povećanje otpornosti na trošenje, dodatno se povećavaju kemijska i korozijska postojanost, otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju i toplinski umor. Postupci prevlačenja koriste se u mnogim granama industrije: automobilska, aeronautička, energetska, tekstilna, biomedicinska, elektronička, kemijska itd. Ovi postupci nisu difuzijski postupci, ali je za prionjivost prevlake na materijal bitna adsorpcija. Riječ je prvenstveno o postupcima taloženja jednog ili više slojeva prevlake drugačijeg sastava na materijal podloge, bez difuzije prevlake u materijal podloge. Moguće su razne vrste spojeva: neoksidne keramike (TiN, TiC, TiCN, TiAlN, SiC, B₄C, ...), oksidne keramike (Al₂O₃, TiO₂, ...), metaloorganski spojevi Me:CH (W₉₇C₃, ...) i DLC-a, dijamantu sličnog ugljika ((Stupnišek i Matijević, 2000.).

Grilec i sur. (2015.) u postupke prevlačenja u parnoj fazi ubrajaju sljedeće postupke:

- kemijsko taloženje iz parne faze (engl. *Chemical Vapour Deposition – CVD*),
- fizikalno taloženje iz parne faze (engl. *Physical Vapour Deposition – PVD*),
- plazmom aktivirano kemijsko taloženje iz parne faze (eng. *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition – PACVD*).

4. ŽITNI KOMBAJN

Kombajn predstavlja složeni radni stroj koji u isto vrijeme obavlja više radnih operacija. Kombajni posjeduju veliku širinu primjene te se sastoje od većeg broja sofisticiranih sustava, a pojedine funkcije su dograđene i usavršene, gubici i oštećenja zrna svedeni su na minimum, a brzina pretovara dosegla je maksimum. Pod pojmom “univerzalni žitni kombajn” podrazumijeva se stroj koji posjeduje mogućnost obavljanja vršidbe više različitih kultura. Sve njegove mehanizme je moguće prilagoditi žetvi ili berbi različitih poljoprivrednih kultura. Žetva kombajnom se odvija u tri faze: košnja žetvene mase, izvršavanje žetvene mase te završno odvajanje zrna od žetvene mase i primjesa. Univerzalni žitni kombajni najčešće preuzimaju izvršeni plod u vlastiti spremnik te ga prevoze iz parcele do kamiona ili traktorske prikolice. Današnji kombajni također posjeduju mogućnost kartiranja plodnosti poljoprivrednih površina. Korištenjem GPS sustava na suvremenim kombajnama koji posjeduju uređaj za mjerenje trenutnog priroda moguće je istovremeno i kartirati plodnost parcele na kojoj je obavljena vršidba, kako bi se u narednim operacijama raspodjele gnojiva na pojedine dijelove parcele moglo pognojiti različitim potrebnim dozama gnojiva (Polak, 2020.).

Osnovna svrha kombajna je žetva raznih žitarica, uljarica, mahunarki, povrća itd. To je sklop sastavljen od više uređaja koji kose, vrše i razdvajaju zrnje od biljnih ostataka. Danas postoje različite izvedbe kombajna ovisno o zahtjevima žetve/berbe pojedine poljoprivredne kulture. Suvremeni žitni kombajni obavljaju sve potrebne funkcije u jednom prohodu. Njima se brzina i kvaliteta žetve udvostručila, izvedeni su sa velikim radnim učincima (Makar, 2015.).

Prema Čuljatu i Barčiću (1997.), zahtjevi na univerzalni žitni kombajn su:

- podobnost za sve vršidbene culture, po mogućnosti bez gubljenja vremena i bez skupih preinaka,
- funkcionalna pouzdanost i kod teških uvjeta žetve (vlažan usjev, zelene proraslice u usjevu i polegao usjev),
- visoka propusna moć uz niske gubitke,
- neosjetljivost na promjene protoka i promjene opterećenja masom,
- malo oštećenje i visoka čistoća zrna,
- malo usitnjavanje slame kod rada bez sječke za slamu,
- podobnost za žetvu na nagibu do oko 12 % s malim gubicima,
- visoka pouzdanost,

- mali troškovi održavanja i dobra pristupačnost (servisibilnost),
- jednostavno, jasno i razumljivo podešavanje te lako opsluživanje,
- malo opterećenje vozača bukom, prašinom i vibracijama,
- kompaktna izvedba kod visoke propusne moći,
- dobra okretnost, manevrabilnost,
- mala težina i široke gume s niskim tlakom,
- lagano čišćenje kod izmjene sorte,
- niski nabavni i pogonski troškovi,
- mala specifična potrebna snaga za savladavanje protoka
- mala potrošnja goriva,
- visoka upotrebna trajnost te dugovječnost.

Primjer žitnog kombajna prikazan je na slici 11.



Slika 11. Žitni kombajn Deutz-Fahr serije C7000 (Izvor: Poljo-Nova, 2023.)

4.1. Glavni radni sklopovi žitnog kombajna

Glavni radni sklopovi žitnog kombajna sastoje se od većeg ili manjeg broja dijelova, koji su funkcionalno i tehnički vezani u jednu cjelinu. Zadatak radnih dijelova je da žitnu masu odrežu ili otkinu, podignu, dopreme do vršidbenog uređaja gdje se odvoji zrno od dijelova koji nisu zrno, zatim na sustavu čišćenja očiste i konačno prenesu u spremnik, a da dio žitne mase koja nije zrno odlože u otkos na polje ili usitne i ujednačeno raspodjele po polju (Zimmer i sur., 2009.).

Prema Makaru (2015.), glavni radni sklopovi žitnog kombajna, prikazani slikom 12., su:

- žetveni uređaj (uređaj za košnju),
- vršidbeni uređaj (uređaj za izdvajanje zrna),
- uređaj za odvajanje zrna od žetvenih ostataka (slamotresi),
- uređaj za transport zrna iz spremnika kombajna do transportnog vozila,
- uređaj za dodatnu vršidbu neovršenih mahuna
- uređaj za obradu žetvenih ostataka.



Slika 12. Glavni radni sklopovi žitnog kombajna (Izvor: Makar, 2015.)

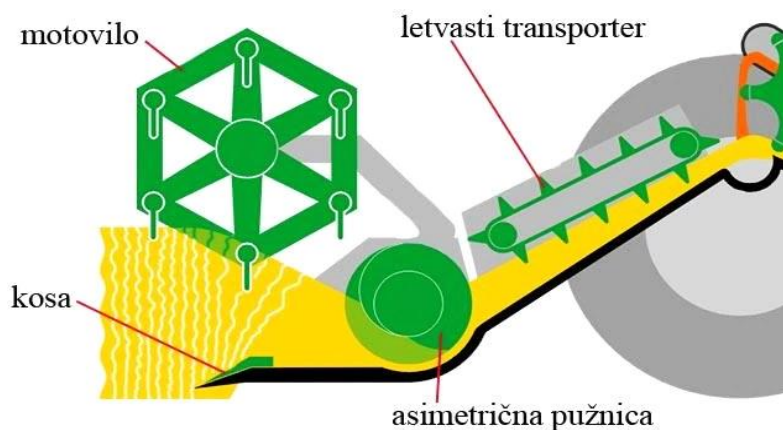
4.1.1. Uređaj za košnju

Zadatak uređaja za košnju (otkosnog uređaja) je da pokosi žetvenu masu, pužnim transporterom ju prikupi na sredinu, te ju preda kosom transporteru, koji ju dovodi do vršidbenog uređaja. Postrani razdjeljivači razdvajaju zahvaćeni dio žetvene mase od ostatka i uz pomoć motovila ga dovode do kose. Nakon što je pokošena, žitna masa se odlaže u sabirnu kadu, po mogućnosti tako da klasje bude okrenuto prema asimetričnoj pužnici (pužnom transporteru). Pužnica zahvaća žetvenu masu, dovodi ju u sredinu, na otvor uvlačnog kanala, te ju uz pomoć uvlačnih prstiju predaje kosom letvastom transporteru. On žitnu masu dovodi do vršidbenog uređaja. Postrani razdjeljivači se sastoje od središnjeg lima za razdvajanje, te vanjskog odbojnog i unutarnjeg dovodnog lima. Sva tri lima se mogu podešavati. Motovilo je, putem hidraulike, prilagodljivo po visini i vodoravnom pravcu (naprijed - natrag). Pužnica se može mehanički prilagođavati u okomitom smjeru, kako bi

razmak između nje i kade bio pravilan, kao i agresivnost uvlačnih prstiju, te je kod pojedinih otkosnih uređaja moguće prilagođavati razmak između pužnog transportera i kose. Kosi letvasti transporter žetvenu masu podiže lancem na koji su pričvršćene letvice. Prilagođavanje visine otkosnog uređaja obavlja rukovatelj iz kabine. Moderniji kombajni samostalno održavaju visinu te se prilagođavaju terenu. Uređaji za košnju dodatno se mogu opremiti za žetvu uljane repice ili suncokreta (Polak, 2020.).

Glavni dijelovi uređaja za košnju, shematski prikazanog na slici 13., su:

- vanjski i unutarnji razdjeljivač,
- kosa,
- motovilo,
- asimetrična pužnica,
- letvasti transporter.



Slika 13. Shematski prikaz uređaja za košnju (Izvor: Celovec, 2017.)

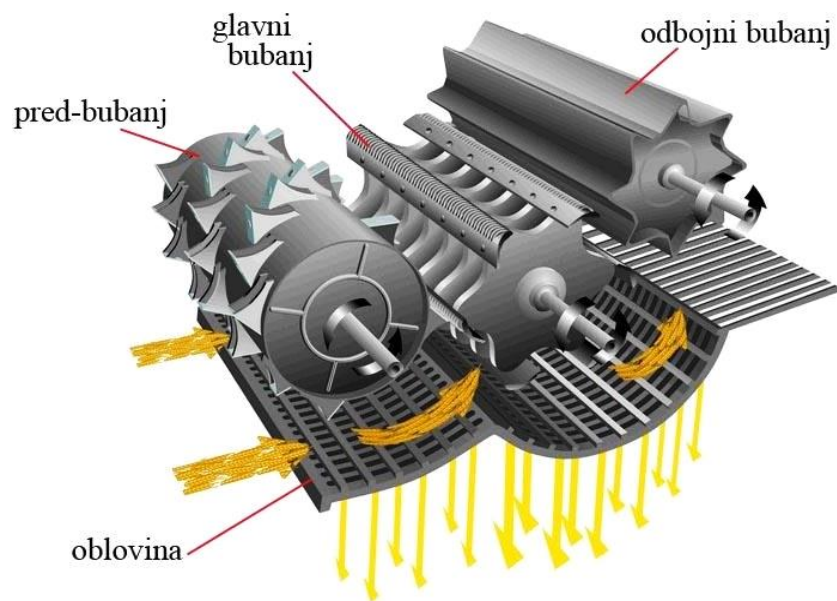
4.1.2. Vršidbeni uređaj

Vršidbeni uređaj oslobađa zrno iz klasa, metlice, mahune ili klipa, odvaja zrno kroz podbubanj i šalje ostatak žetvene mase sa preostalim zrnom na daljnje izdvajanje. Traži se visoka učinkovitost, što manje oštećenje zrna, što veće odvajanje zrna kroz podbubanj, malo oštećenje slame kako bi bilo što manje kratke slame, mali utrošak energije, te što manji gubitci. Funkcija vršidbenog uređaja je da preuzme žetvenu masu od kosog transportera i uvede ju u prostor između bubnja i podbubnja. Vršidba se obavlja udaranjem i trljanjem. Više od 90 % zrna prođe kroz podbubanj na uređaj za pročišćavanje. Odbojni biter zaustavi dio preostalog ovršenog zrna i usmjeri ga kroz vile za usmjeravanje slame na prednji dio slamotresa. U žetvi strnih žitarica bubanj je otvoren i sastoji se od 6, 8 ili 10 letava sa

mogućnošću zamjene s lijevim i desnim rebrima. Na izlazni dio podbubnja se nastavljaju žice koje usmjeravaju žetvenu masu na slamotrese. Sakupljač kamena štiti vršidbeni uređaj i prazni se izvana, te je potrebno povremeno pražnjenje i tamo gdje kamena nema jer se uvijek nakupi nešto mehaničkih nečistoća. Zadatak uređaja za odvajanje zrna od slame je da izdvoji preostalo zrno iz žetvene mase, da pomiješa dugu slamu prema izlazu te da dovede preostalo zrno na uređaj za pročišćavanje. Od njega se traži što bolje izdvajanje zrna te što manje kratke slame na slamotresima (Polak, 2020.).

Glavni dijelovi vršidbenog uređaja, shematski prikazanog na slici 14., su:

- predbubanj,
- glavni bubanj,
- podbubanj ili oblovina,
- odbojni bubanj (biter),
- sakupljač kamena.



Slika 14. Shematski prikaz vršidbenog uređaja (Izvor: Makar, 2015.)

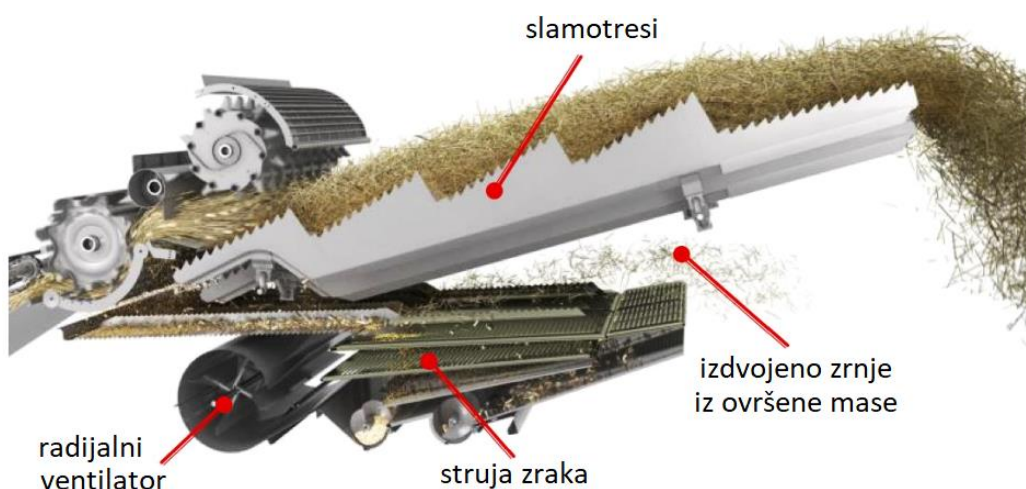
4.1.3. Uređaj za odvajanje zrna od žetvenih ostataka (slamotresi)

Slamotresi (istresaljke) odvajaju ovršeno zrno iz slame i izbacuje slamu iz kombajna. Postoje sekcijski slamotresi s jednim ili dva pogona koljenastog vratila. Ekscentri pokreću koljenasta vratila, na koja su ležajima vezane sekcije. Broj koljena vratila ekvivalentan je broju sekcija. Broj sekcija ovisi o tipu kombajna i kreće se od 3, kod kombajna manjeg kapaciteta, do 6, kod kombajna velikog kapaciteta. Površina slamotresa je u rasponu od 3,0 do 8,0 m².

Slamotresi su postavljeni pod kutom iznad sabirne ravnine, kako bi istresli cijelo zrno. Sekcije su nezavisne i svaka ima drugačiji položaj u radu. Stepenaste su izvedbe sa 4 - 6 stepenica i rešetkastom radnom površinom. Ispod rešetkaste radne površine nalazi se korito slamotresa (Bagarić, 2019.).

Uređaj za čišćenje zrna prima na sabirnu ravninu svu ovršenu masu koja je prošla kroz oblovinu i klizno korito slamotresa, a njegov zadatak je odvajanje zrna od kratke slame i pljeve. Drugi naziv za ovog uređaja je lađa, a čine ju: sabirna ravnina, gornje rešeto, donje rešeto, ventilator, sabirne ravnine rešeta te transportni uređaji za zrno i neovršene klasiće. Pozicija lađe je ispod oblovine i kliznog korita slamotresa. Izvodi se u jednodijelnoj i dvodijelnoj izvedbi. Površina joj je rebrasta te uzdužno podijeljena s nekoliko letvi na 3 ili 4 jednaka dijela. Ovime se osigurava ravnomjerna raspodjela mase koja dolazi do izražaja pri težim uvjetima rada, npr. nagnutom terenu. Oscilirajućim gibanjem raslojavaju se teža zrna od pljeve i kratke slame. Gornje rešeto može se podignuti kako bi se spriječilo ispadanje neovršenih klasića iz vršalice kombajna. Bolje prosijavanje neovršenih klasića ostvaruje se produžetkom u obliku rešeta s bradavičastim otvorima i češljastim nastavkom. Donje rešeto je kod nekih kombajna promjenjivo, ovisno o kulturi koja se vrši, no većinom je iste građe kao i gornje rešeto. Strujanje zračne struje kroz donje i gornje rešeto ima ključnu ulogu u odvajanju kratke slame i pljeve. Strujanje se ostvaruje ventilatorom koji je uglavnom u radijalnoj izvedbi. Njegovo kućište izgrađeno je od limova koji služe za prigušivanje i usmjeravanje zračne struje. Prigušivanjem zraka regulira se veličina ulaznog otvora ventilatora no kod smanjenog ulaznog otvora za oko 60 % neravnomjernost protoka zračne struje znatno raste, pa treba biti oprezan tijekom reguliranja veličine otvora (Balog, 2022.).

Slika 15. prikazuje najvažnije dijelove uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka.



Slika 15. Uređaj za odvajanje zrna od žetvenih ostataka (Izvor: Bucifal Tomić, 2016.)

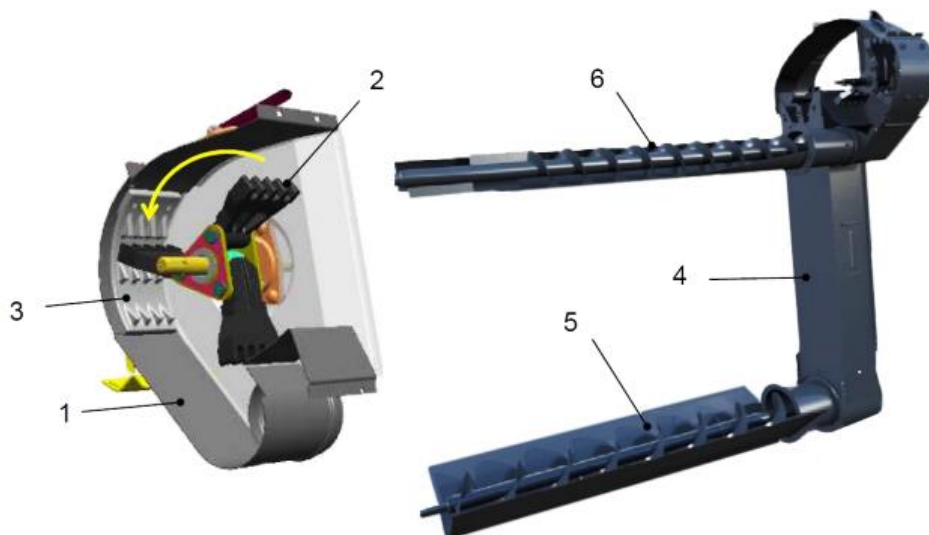
4.1.4. Uređaj za transport zrna iz spremnika do transportnog vozila

Nakon što je zrno pročišćeno dovodi se do spremnika za zrno pomoću uređaja za transport zrna, prikazanog na slici 12. Uloga uređaja za transport zrna je dovodenje zrna u spremnik te pražnjenje spremnika za zrno. Traži se siguran transport, minimalno oštećenje zrna, što veći spremnik za zrno, brzo pražnjenje spremnika i po mogućnosti potpuno pražnjenje. Ovaj se uređaj sastoji od: pužnog transportera za zrno, elevatora, transportne pužnice za raspodjelu zrna u spremniku, spremnika za zrno i cijevi sa transportnom pužnicom za pražnjenje spremnika. Kod suvremenih kombajna transportna pužnica se može nalaziti u svim položajima tijekom pražnjenja spremnika što omogućuje ravnomjerno punjenje kamiona ili traktorske prikolice.

4.1.5. Uređaj za dodatnu vršidbu neovršenih mahuna

Uređaj za pročišćavanje odvaja zrna od svega što nije zrno, izdvaja neovršene klasove, klipove ili metlice te usmjerava njihov povrat u uređaj za dodatnu vršidbu. Slobodna zrna i neovršeni klasovi uslijed preopterećenja uređaja propadaju kroz produžetak gornjeg sita na povratno dno neovršenog klasa i putuju do pužnog transportera za neovršeno klasje. Zadatak uređaja za naknadnu vršidbu je sakupljanje neovršenog klasja, dijelova klipa ili metlica prosa i sirka koji nisu potpuno ovršeni, te njihov povrat do bubnja ili do zasebnog uređaja za ponovnu vršidbu. Od ovog uređaja se zahtijeva potpuni izvršaj, minimalno oštećenje zrna te pouzdani transport. Dijelovi uređaja za naknadnu vršidbu su: transporter neovršenog klasja, rasporedna pužnica te, kod pojedinih proizvođača, bubanj za naknadno izvršavanje. Kod takvih kombajna se transport i ponovno izvršavanje obavljaju u donjoj glavi elevatora s kockastom oblogom (Polak, 2020.).

Jedan od primjera konstrukcije uređaja za dodatnu vršidbu predstavlja „Rostselmash“ sustav povratne mase, osmišljen tako da sva neovršena masa prvo dopijeva u prostor sa nazubljenim lopaticama, te onda još naknadno u bubanj. Ovo rješenje također omogućuje da se oslobodi glavni bubanj za vršidbu, povećanjem dopuštenih gubitaka na podsklopu. Slika 16. prikazuje dijelove sustava povratne mase kombajnu „Rostselmash VECTOR 425“ (Marić, 2019.).



Slika 16. Dijelovi sustava povratne mase kombajna „Rostselmash“ (Izvor: Marić, 2019.)

4.1.6. Uređaj za obradu žetvenih ostataka

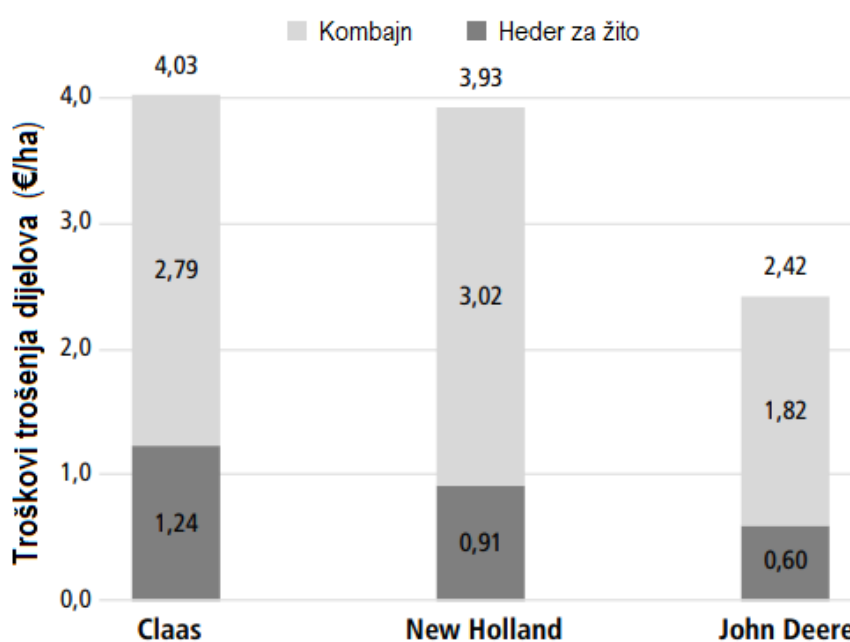
Sječkalica, sječka ili „tarup“, sve su to nazivi završnog dijela procesa u radu kombajna, što je sastavnica svake modernije izvedbe kombajna, koja ima zadatak svu izvršenu žitnu masu samljeti i usitniti te pravilno rasporediti po strništu parcele na kojoj se obavlja žetva. Uređaj se nalazi na repu kombajna te stoji horizontalno u odnosu na vršalicu. Sastoji se od osovine i valjka na kojemu su poredani noževi u pravilnom razmaku. Kompletna sječkalica na kombajnu sastoji se od više redova noževa, te u svakome redu po više komada noževa, koji se pokreću pomoću dvožilnog remena koji dobiva snagu od pogonskog agregata kombajna, te razbacivača ili tzv. „lepeze“ koja razbacuje žetvene ostatke po parceli (Bagarić, 2019.). Primjer uređaja za obradu žetvenih ostataka prikazan je na slici 17.



Slika 17. Uređaj za obradu žetvenih ostataka (Izvor: Korbanek, 2019.)

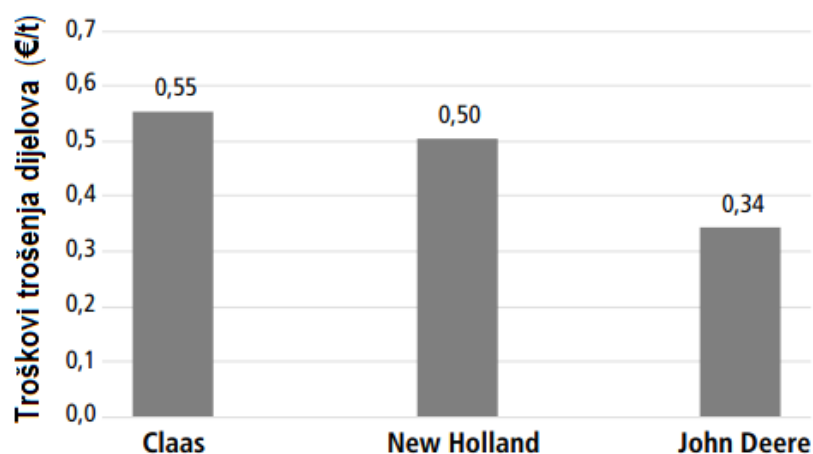
5. RADNI DIJELOVI ŽITNOG KOMBAJNA IZLOŽENI TROŠENJU

Kombajn je kapitalno najintenzivniji (financijski najvrijedniji) stroj na mnogim farmama. Stoga je važno poznavati troškove stroja i procesa. U praksi se pokazalo da poljoprivrednici vrlo često nisu dovoljno svjesni troškova kombajnske žetve. Tome doprinosi i činjenica da točni podaci različitih proizvođača kombajna često nisu dostupni za troškove održavanja, popravaka i istrošenosti. Međutim, potrebno je poznavati te troškove kako bi se mogao razmotriti proizvod, u ovom slučaju kombajn, i troškovi tijekom njegovog životnog ciklusa. Troškovi trošenja analizirani su u okviru jednog istraživanja provedenog anketiranjem vlasnika žitnih kombajna diljem Njemačke. Tijekom studije ispitani su svi potrošni dijelovi tijekom žetve usjeva i svi povezani pogoni. Istraživanjem su prikupljeni podaci s 55 strojeva, od toga 25 hibridnih kombajna „Claas“, 14 kombajna s dva rotora „New Holland“ i 16 kombajna s jednim rotorom „John Deere“. Strojevi su u prosjeku odradili po šest žetvi i požnjeli u prosjeku oko 4.000 ha. Rezultati istraživanja prikazani su grafovima 1. i 2. Graf 1. Prikazuje troškove trošenja dijelova kombajna po hektaru žetve, a graf 2. troškove trošenja dijelova po toni požnjevenog zrna (Sigmund, 2019.).



Grafikon 1. Troškovi trošenja dijelova kombajna po hektaru žetve (Izvor: Sigmund, 2019.)

Rezultati su pokazali jasne razlike između sustava vršidbe. Troškovi trošenja za hibridne kombajne iznosili su u prosjeku 4,03 €/ha. Kombajni s dva rotora imali su trošak od 3,93 €/ha, dok su oni sa samo jednim rotorom imali trošak od 2,42 €/ha. Pritom je utvrđeno da je udio troškova dijelova hedera od 23 do 31 % ukupnih troškova trošenja (Sigmund, 2019.).



Grafikon 2. Troškovi trošenja dijelova kombajna po toni žitarice (Izvor: Sigmund, 2019.)

Troškovi trošenja po toni zrna iznosili su 0,55 €/t za hibridne kombajne, 0,50 €/t za kombajne s dvostrukim rotorom i 0,34 €/t za kombajne s jednim rotorom. Ako se usporede troškovi trošenja pojedinih sustava vršidbe, vidi se da postoje razlike i do 35 %. U konačnici, s prosječnim učinkom od 4.000 ha po stroju, postoje razlike od ukupno 6.400 € između pojedinačnih proizvođača (Sigmund, 2019.).

5.1. Trošenje dijelova uređaja za košnju

Na temelju prethodnog istraživanja može se zaključiti da su najzloženiji trošenju dijelovi kombajna koji su u sastavu uređaja za košnju. Uzrok tomu je što su radni dijelovi uređaja za košnju (razdjeljivači, kosa, motovilo, pužnica i transporter) u najintenzivnijem kontaktu sa žetvenom masom u kojoj se, osim žetvenih biljaka, može naći različitih vrsta trave i korova, grumenja zemlje, kamenja, nečistoća, kukaca itd., pa čak i životinja koje obitavaju u žitnom polju. Slike 18. i 19. prikazuju primjere trošenja dijelova uređaja za košnju.



Slika 18. Trošenje razdjeljivača (a), noževa i prstiju kose (b) (Izvor: Bertling, 2022.)

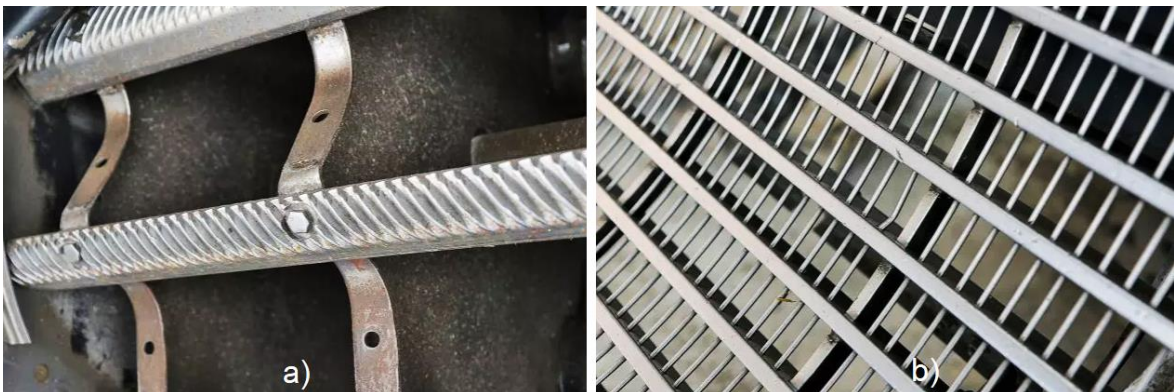


Slika 19. Trošenje spirale (a) i gibljivih prstiju (b) pužnice (Izvor: Agrarheute, 2018.)

Najzastupljeniji mehanizmi trošenja kod dijelova uređaja za košenje su abrazija žetvenom masom i ranije navedenim primjesama, korozija uslijed djelovanja biljnih sokova zelenih biljaka (trava, korov itd.) i trobokorozija uslijed istovremenog abrazijskog i korozijskog djelovanja masom koja ulazi u otkosni uređaj.

5.2. Trošenje dijelova vršidbenog uređaja

Trošenju su izloženi dijelovi podbubnja i bubnja preko kojih prelazi žetvena masa koja ima određena abrazijska svojstva, pa je i dominantni mehanizam trošenja abrazija. Tragovi trošenja vidljivi su u obliku zaglađenja nazubljenih dijelova šipki za vršidbu, matica kojima su šipke učvršćene na nosače i košare podbubnja. Slika 20. prikazuje primjere trošenja dijelova vršidbenog uređaja.



Slika 20. Trošenje bubnja (a) i podbubnja (b) (Izvor: Agrarheute, 2018.)

5.3. Trošenje dijelova uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka

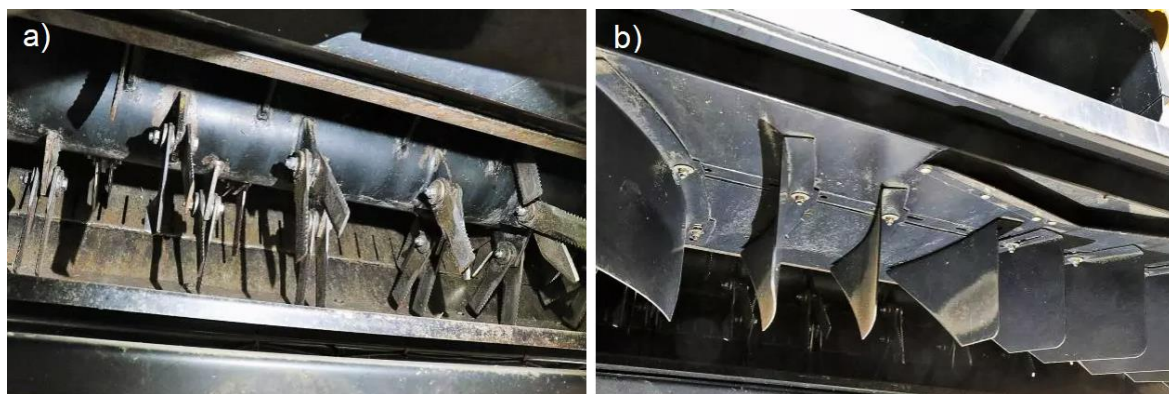
Dijelovi uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka, prije svega slamotresi i rešeta (gornje i donje) izloženi su trošenju zbog toga što preko njihovih površina prelaze - klize i skakuću, zrna žitarica te različiti oblici slame, pljeve, neovršenih klasova i drugih žetvenih ostataka koji se odvajaju od zrna. Svojim prelaskom iste čestice djeluju abrazijski na površine radnih dijelova, odnoseći dijelove materijala od koji su isti izrađeni. Slika 21. prikazuje primjere trošenja dijelova uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka.



Slika 21. Trošenje slamotresa (a) i gornjeg rešeta (b) (Izvor: Agrarheute, 2018.)

5.4. Trošenje dijelova uređaja za obradu žetvenih ostataka

Dijelovi uređaja za obradu žetvenih ostataka izloženi su vrlo intenzivnom trošenju zbog svoje osnovne funkcije – mljevenje i usitnjavanje žetvenih ostataka udarcima noževa velikim brzinama po izvršenoj slami i drugim primjesama, te da ih razbacaju i pravilno rasporede po strništu. Takvo djelovanje uzrokuje intenzivno trošenje noževa (usporedivo s trošenjem noževa uređaja za košnju) mehanizmima abrazije i umora površine, te abraziju vodećih ploča koje usmjeravaju razbacivanje usitnjenih ostataka, kao što je prikazano na slici 22.



Slika 22. Trošenje noževa (a) i vodećih ploča razbacivača (b) (Izvor: Agrarheute, 2018.)

6. TVRDI SLOJEVI U ZAŠTITI OD TROŠENJA DIJELOVA ŽITNOG KOMBajNA

U zaštiti od trošenja dijelova žitnih kombajna primjenjuju se različite vrste materijala i tehnologija kojima se ojačava površina koja je izložena trošenju. U prethodnom poglavlju naznačeni su primjeri dijelova koji su u kategoriji jače izloženih trošenju tijekom žetve. Neke od tih dijelova njihovi proizvođači izrađuju u izvedbi sa zaštitom od trošenja primjenom određenog postupka modificiranja površina s ciljem povećanja njihove tvrdoće ili prevlačenja tvrdim slojem. Pritom se, od postupaka modificiranja površina, najčešće se primjenjuju toplinski postupci kaljenja (Group Schumacher, 2023.). Od toplinsko-kemijskih postupaka najčešće se primjenjuju nitriranje, nitrokarburiranje i boriranje (BorTec, 2023.). Kad je u pitanju prevlačenje, najčešće se primjenjuju tvrde prevlake metalnih karbida na bazi Ni, Cr, W i Co (Fisher Barton, 2023.).

Budući da je prevlačenje tribološkim prevlakama iznimno aktualno područje tehnoloških inovacija, provedena su i istraživanja prevlaka ostvarenih postupkom visokobrzinskog plamenog naštrcavanja (HVOF), koja su ukazala na mogućnosti primjene tako izvedenih tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja dijelova žitnog kombajna, prije svega noževa za žitnu masu (Khuengpukheiw, 2021.).

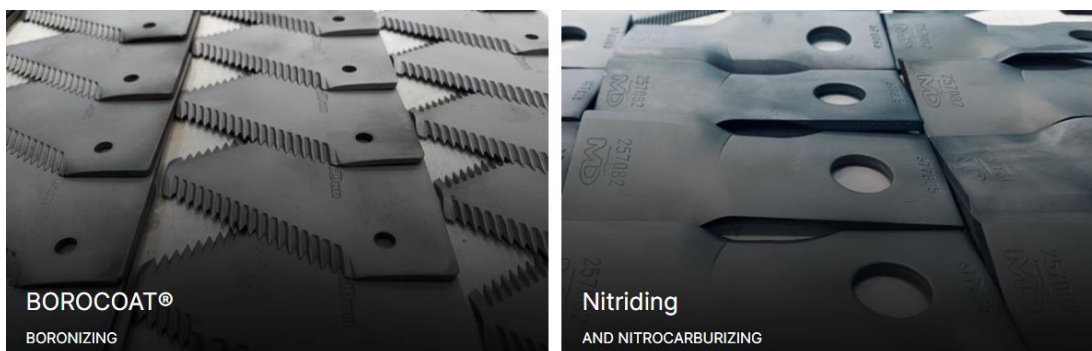
U daljnjem dijelu rada prikazano je nekoliko primjera dijelova žitnog kombajna koji su proizvedeni sa zaštitom od trošenja tvrdim slojevima. Budući da noževi kose na uređaju za košnju i noževi uređaja za obradu (usitnjavanje) žetvenih ostataka spadaju u kategoriju dijelova koji su izloženi najintenzivnijem trošenju različitim mehanizmima (abrazijom, tribokorozijom i umorom površine), prikazani su primjeri njihove zaštite od trošenja.

Slika 23. prikazuje noževe kose uređaja za košnju i nož uređaja za obradu žetvenih ostataka, koji su ojačani protiv trošenja primjenom postupka indukcijskog kaljenja. Takvim postupkom značajno im je povećana tvrdoća oštrica, što je temeljni način zaštite od trošenja.



Slika 23. Indukcijski kaljeni noževi (Izvor: Group Schumacher, 2023.)

Nkao što je prethodno navedeno, noževi za košnju žetvene mase i usitnjavanje žetvenih ostataka proizvođački se ojačavaju protiv trošenja i postupcima boriranja, nitriranja i nitrokarburiranja, kao što je prikazano primjerom na slici 24. Time se na oštricama noževa ostvaruju tvrdoće koje su značajno veće od tvrdoće osnovnog materijala (uglavnom alatnog čelika), ali i od tvrdoća koje se mogu ostvariti toplinskim postupcima kaljenja.



Slika 24. Borirani, nitrirani i nitrokarburirani noževi (Izvor: BorTec, 2023.)

Tvrtka Fisher Barton razvila je postupak prevlačenja površina tvrdim slojem na bazi volfram-karbida i nikla (WC/Ni materijali), poznat pod nazivom FluxFuse®. Specifičnost postupka je u tome da visoka toplinska vodljivost prevlake osigurava brzo zagrijavanje i ujednačenost toplinskog procesa. Proces prevlačenja omogućuje zagrijavanje komponenti samo jednom, što bitno pomaže u smanjenju izobličenja tankih proizvoda. Metalurška veza prevlake poboljšana je zaštitnim okruženjem kupke topitelja i sposobnošću da se izolira vruće dijelove od bilo kakvog utjecaja kisika. S obzirom na navedene karakteristike, navedeni postupak primjenjuje se u zaštiti od trošenja noževa za usitnjavanje žetvenih ostataka, prikazanih slikom 25. (Fisher Barton, 2023.).



Slika 25. Noževi s tvrdim slojem na bazi WC/Ni materijala (Izvor: Fisher Barton, 2023.)

Opisanom tehnologijom tvrtka Fisher Barton proširila je proizvodni program dijelova žitnih kombajna koji su zaštićeni prevlakama od trošenja, kao što je prikazano na slici 26.



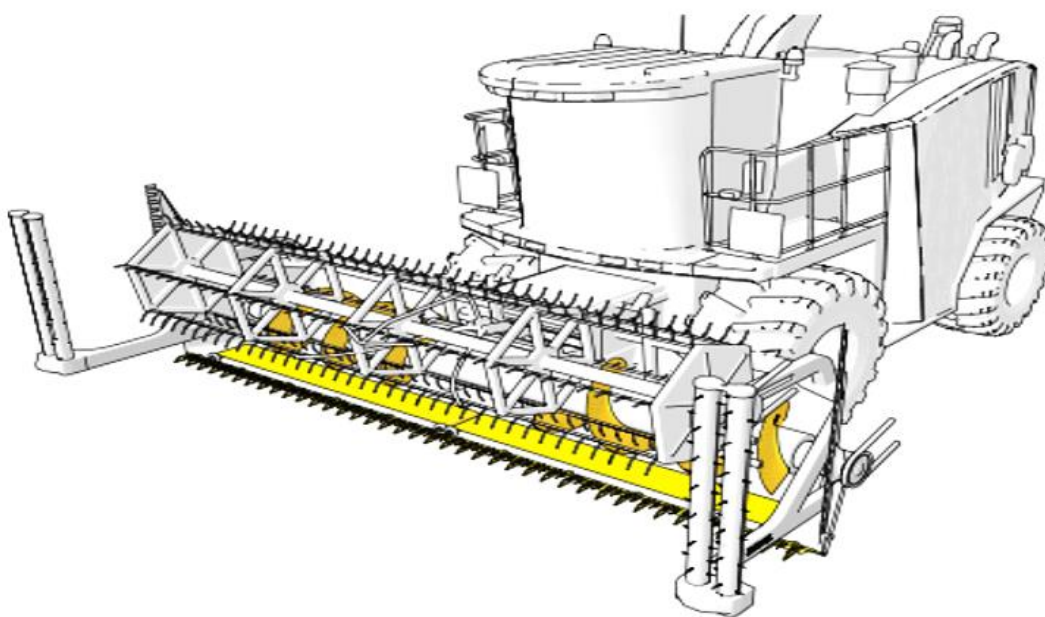
Slika 26. Dijelovi žitnih kombajna s tvrdim karbidnim slojem protiv trošenja
(Izvor: Fisher Barton, 2023.)

Tvrtka Group Schumacher proizvodi tzv. samooštreći nož za usitnjavanje žetvenih ostataka, koji je u donjem dijelu oštrice ojačan tvrdim slojem metalnog karbida, a gornja površina mu je mekša. U radu se brže troši mekši materijal, a donja se površina ističe kao rezni brid noža. Time se rezna svojstva (oštrina) noža zadržavaju dulje vrijeme (Group Schumacher, 2018.).



Slika 27. Nož za usitnjavanje žetvenih ostataka ojačan tvrdim slojem
(Izvor: Group Schumacher, 2018.)

Kod suvremenih se kombajna, u izradi dijelova uređaja za košenje koji su većih površina (greda kose, spirala pužnice, itd.), kao što je prikazano na slici 28., sve više primjenjuju Hardox® čelici, švedskog proizvođača SSAB. Takvi čelici se definiraju kao vrsta čelika visoke izdržljivosti, prije svega visoke otpornosti na trošenje (uglavnom abraziju). Zbog činjenice da se sporo troši pod velikim mehaničkim opterećenjem, Hardox čelik je općenito poznat kao trošeća ploča (engl. *wear plate*). Riječ je čeliku koji je izvorno, tijekom proizvodnje u obliku ploča (limova), podvrgnut postupku kaljenja, čime mu je stvorena struktura visoke tvrdoće (martenzit) koja je otporna na trošenje. Takve ploče primjenjuju se u izradi različitih dijelova koji imaju velike radne površine, a u radu su izloženi trošenju.



Slika 28. Dijelovi uređaja za košnju izrađeni od Hardox materijala (Izvor: Hardox, 2023.)

Iako se, u užem smislu, ploče Hardox čelika ne mogu u potpunosti poistovjetiti s pojmom „tvrdih slojeva otpornih trošenju“, riječ je o materijalu koji se sve češće primjenjuje u izradi dijelova kombajna, upravo zbog svojstva otpornosti trošenju (vezano uz površinu materijala) koje se dobiva modificiranjem strukture toplinskom obradom. Stoga se ipak treba spomenuti u okviru ovog rada.

7. ZAKLJUČAK

Radni dijelovi žitnog kombajna izloženi su tijekom svog rada različitim mehanizmima trošenja. Najzastupljeniji je mehanizam abrazije, uz nešto slabiju koroziju i umor površine. Prije nego li se pristupi bilo kakvoj zaštiti dijela stroja od trošenja, bitno je analizirati koji su čimbenici uključeni u određeni slučaj trošenja i koji je dominantni (najutjecajniji) mehanizam trošenja pritom zastupljen, te kako mu se najučinkovitije suprotstaviti.

Najučinkovitija metoda zaštite površina radnih dijelova je izbor odgovarajućeg materijala tijekom izrade dijelova. U okviru toga, razvijen je veliki broj različitih postupaka kojima se radnim površinama dijelova, koje su izložene trošenju, povećava tvrdoća, kao najvažnije mehaničko svojstvo u otporu mehanizmu trošenja. Pritom, odlučujuću ulogu u zaštiti od trošenja ima sloj materijala neposredno ispod površine, koji ne mora nužno biti velike debljine, ali mora biti vrlo tvrd. Takvi tvrdi slojevi ostvaruju se postupcima modificiranja i prevlačenja površina materijala od kojega je izrađen cijeli dio.

Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja dijelova žitnih kombajna učinkovita je strategija za poboljšanje izdržljivosti i dugotrajnosti ključnih dijelova stroja. Tvrdi slojevi se mogu primijeniti na dijelovima koji su najviše izloženi trošenju, poput noževa uređaja za košnju i noževa za obradu žetvenih ostataka, kao i za druge dijelove kombajna, koji su nešto slabije izloženi trošenju, ali je ono ipak izraženo. Riječ je dijelovima vršidbenog uređaja (bubanj i podbubanj), dijelovima uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka (slamotresi i rešeta za čišćenje zrna), te drugim dijelovima u sustavu transporta zrna i sustavu za prijenos snage.

Analizirani primjeri dijelova kombajna, koji su najizloženiji trošenju, pokazuju da su za njihovu zaštitu primjenjivani toplinski i toplinsko-kemijski postupci modificiranja površine te postupci prevlačenja tvrdim slojevima na bazi metalnih karbida.

Međutim, važno je napomenuti da primjena tvrdih slojeva nije univerzalno rješenje za smanjenje trošenja dijelova. Vrlo je bitno ispravno rukovanje strojem, provođenje redovitog održavanja stroja i pravovremena zamjena dijelova koji su izloženi najvećem trošenju.

8. POPIS LITERATURE

1. Agrarheute (2018.): Mährescher: Schneidwerk und Schrägförderer fit für die Ernte machen. <https://www.agrarheute.com/technik/ackerbautechnik/maehdrescher-schneidwerk-schraegfoerderer-fit-fuer-ernte-535972> (10.04.2023.)
2. Bagarić, M. (2019.): Razvoj pogonskih agregata kombajna. Završni rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
3. Balog, F. (2022.): Utjecaj kapaciteta žitnog kombajna „Claas Lexion 560“ na broj transportnih sredstava u žetvi pšenice. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
4. Benjak, M. (2017.): Karakterizacija tankih tvrdih prevlaka na bazi titanija. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
5. Bertling, A. (2022.): Vorerntecheck am Mährescherschneidwerk: Scharfer Schnitt für sauberen Drusch. <https://www.profi.de/praktisch/praktisch/vorerntecheck-am-maehdrescherschneidwerk-scharfer-schnitt-fuer-sauberen-drusch-12588907.html> (11.04.2023.)
6. BorTec (2023.): Harvesting Machinery. Boronizing and Nitriding for Agricultural Machinery. <https://bortec-group.com/industries/agricultural-machinery-technology/> (15.04.2023.)
7. Bucifal Tomić, T. (2016.): Kakvoća rada kombajna u žetvi žitarica pri različitim eksploatacijskim uvjetima, Završni rad, Visoko gospodarsko učilište u Križevcima.
8. Celovec, M. (2017.): Kakvoća rada kombajna „Deutz-Fahr M 1322 H“ pri različitim brzinama. Završni rad, Visoko gospodarsko učilište u Križevcima.
9. Cindrić, M. (2020.): Usporedba svojstava različitih prevlaka na konstrukcijskim čelicima. Završni specijalistički rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
10. Čuljat, M.; Barčić, J. (1997.): Poljoprivredni kombajni. Poljoprivredni institut Osijek.
11. DIN 50320:1979-12 (1979.). <https://www.beuth.de/de/norm/din-50320/1647273> (25.03.2023.)

12. Drčec, Z. (2010.): Trošenje kotrljajućih ležaja poljoprivrednih strojeva. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku.
13. Đurkić, A. (2018.): Analiza trošenja kotrljajućih ležaja trakastog transportera za sjeme suncokreta u pogonu za prešanje Tvornice ulja Čepin. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
14. Fisher Barton (2023.): Harvesting Packaging. <https://www.fisherbarton.com/products/wear-products/harvesting-packaging/> (11.04.2023.)
15. Giber, T.(2020.): Vrste postupaka toplinskog naštrcavanja i njihova primjena na dijelovima poljoprivredne tehnike, Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
16. Grilec, K.; Jakovljević, S.; Marić, G. (2015.): Tribologija u strojarstvu. Udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
17. Group Schumacher (2018.): radura® HäckselTechnik. <https://pdf.agriexpo.online/de/pdf/group-schumacher/haeckseltechnik/169106-38512.html#open123201> (12.04.2023.)
18. Group Schumacher (2023.): radura® Parts Combine Harvesting. <https://groupschumacher.com/en/parts/combine-harvesting/> (10.04.2023.)
19. Hardox (2023.): Combine harvesters. <https://www.hardoxwearparts.com/en/equipment/combine-harvesters> (7.04.2023.)
20. Heffer, G. (2002.): Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih abrazijskih čestica. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
21. Heffer, G., Vujčić, M., Jurić, T. (1998.): Wear of agricultural tools by soil particles. *Strojarstvo*, 40(5-6), 221-227.
22. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju (1993.): Inženjerstvo površina. Bilten, br. 1/93.
23. Ivušić, V.; (1998): Tribologija. Udžbenik, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb.
24. Jackson, R.P. (2020.): Engineering Tribology. PDH Online Course M427. <https://pdhonline.com/courses/m427/m427content.pdf> (15.03.2023.)

25. Janješić, F. (2019.): Analiza trošenja pokretnih dijelova homogenizatora za miješanje smjese u tvornici stočne hrane „Vitalka“ u Osijeku. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
26. Khuengpukheiw, R.; Saikaew, C.; Wisitsoraat, A. (2021.). Wear resistance of HVOF sprayed NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co, and WC-Cr₃C₂-Ni rice harvesting blades. *Materials Testing*. 63. 62-72.
27. Kolumbić, Z.; Dunder, M. (2011.): Elementi strojeva 2 – Trenje, trošenje i podmazivanje. E-udžbenik, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet, Odsjek za politehniku, Rijeka. <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrošenjeIPodmazivanje.pdf> (10.03.2023.)
28. Korbanek (2019.): Katalog Rostselmash VECTOR 425. <https://katalog.korbanek.pl/page/rostselmash/korbanek.pl-Rostselmash-VECTOR-425.pdf> (05.04.2023.)
29. Kovačević V.; Vrsaljko D., (2011.): Inženjerstvo površina – Tribologija. Nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Zagreb.
30. Leksikografski zavod Miroslav Krleža – LZMK (2018.): Hrvatska tehnička enciklopedija. <https://tehnika.lzmk.hr/tribologija/> (10.03.2023.)
31. Lončarić, I. (2021.): Tribologija u obradi metala trenje, trošenje i podmazivanje, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci.
32. Makar, M. (2015.): Utjecaj tehničkih karakteristika uređaja kombajna u žetvi žitarica na kakvoću rada. Završni rad, Visoko gospodarsko učilište u Križevcima.
33. Marković, R.; Milinović, A. (2009.): Mikrostruktura i svojstva duplex (C+N) slojeva. *Tehnički Vjesnik*, Vol. 16, No. 1, 25-29.
34. Mateša, I. (2019.): Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranih slojeva. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
35. Poljo-Nova (2023.): DEUTZ-FAHR kombajni. <https://poljonova.hr/kombajni-deutz-fahr/> (30.03.2023.)
36. Polović, F. (2018.): Usporedba svojstava tvrdih prevlaka na alatnom čeliku za topli rad EN X37CrMoV5-1. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.

37. Poretti, R. (2008.): Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja radnih dijelova poljoprivredne mehanizacije. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek.
38. 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> (18.03.2023.)
39. Radić, A. (2021.): Primjena postupaka cementiranja u izradi dijelova poljoprivrednih strojeva. Diplomski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek.
40. Razum, T. (2014.): Prionjivost nanostrukturiranih keramičkih prevlaka. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
41. 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, 8.06.2000. 53-62.
42. Tadić, J. (2015.): Ispitivanje kemijske postojanosti PACVD slojeva. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
43. Titan Sisak (2012.): Primjena prevlaka u industriji. Radno-promotivni materijal. https://www.titansisak.hr/pdf/Primjena_prevlaka_u_industriji.pdf (21.03.2023.)
44. 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.
45. Vukes, T. (2021.): Karakterizacija PVD TiN prevlaka na Ti leguri. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
46. Zimmer, R.; Košutić, S., Zimmer, D. (2009.): Poljoprivredna tehnika u ratarstvu. Udžbenik, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek.
47. Žnidarec, T. (2009.): Utjecaj mikrostrukture na tribomehanička svojstva čelika. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.

9. SAŽETAK

Trošenje materijala prisutno je u svim područjima gospodarstva u kojima se koriste bilo kakva tehnička sredstva koja u svom sastavu imaju dijelove u gibanju. Poljoprivreda u svojoj osnovnoj djelatnosti, proizvodnji poljoprivrednih dobara, primjenjuje brojnu mehanizaciju koja je tijekom eksploatacije izložena različitim oblicima trošenja, ovisno o uvjetima i dinamici rada, te okruženju u kome funkcionira. Najzastupljeniji oblik trošenja u poljoprivredi je abrazijsko trošenje česticama tla, a najviše su mu izloženi strojevi i uređaji za obradu tla. Troškovi trošenja materijala radnih dijelova i posljedice koje mogu nastati uslijed trošenja u poljoprivredi, koja je djelatnost sezonskog karaktera, mogu biti izrazito nepovoljni po njezinu ukupnu ekonomsku učinkovitost.

Kombajn je u svom radu tijekom žetve u neposrednom kontaktu sa žetvenom masom u kojoj se, osim žetvenih biljaka, može naći različitih vrsta trave i korova, grumenja zemlje, kamenja, nečistoća itd. Prolazak žetvene mase kroz uređaje kombajna u radnom procesu uzrokuju pojavu trošenja na radnim površinama dijelova kombajna. Najzastupljeniji mehanizam trošenja je abrazija, a uz nju još se pojavljuju korozija i umor površine. Trošenju su najizloženiiji dijelovi uređaja za košnju i uređaja za obradu žetvenih ostataka, a nešto manje dijelovi vršidbenog uređaja i uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka.

Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja vrlo je učinkovita mjera. Kod kombajna se tvrdi slojevi primjenjuju na dijelovima koji su najviše izloženi trošenju, poput noževa uređaja za košnju i noževa za obradu žetvenih ostataka, te dijelovima vršidbenog uređaja (bubanj i podbubanj) i uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka (slamotresi i rešeta za čišćenje zrna). Analizirani primjeri dijelova kombajna, koji su najizloženiiji trošenju, pokazuju da su za njihovu zaštitu primjenjivani toplinski i toplinsko-kemijski postupci modificiranja površine te postupci prevlačenja tvrdim slojevima na bazi metalnih karbida.

Ključne riječi: trošenje materijala, zaštita od trošenja, žitni kombajn, tvrdi slojevi

10. SUMMARY

The wear of materials is present in all areas of the economy in which any technical means are used that have moving parts in their composition. Agriculture in its basic activity, the production of agricultural goods, uses numerous machinery that is exposed to various forms of wear during exploitation, depending on the conditions and dynamics of work, and the environment in which it functions. The most represented form of wear in agriculture is abrasive wear by soil particles, and machines and devices for tillage are most exposed to it. The costs of material wear of working parts and the consequences that may arise as a result of wear in agriculture, which is a seasonal activity, can be extremely unfavorable for its overall economic efficiency.

In its work during the harvest, the harvester is in direct contact with the harvested mass, in which, in addition to harvested plants, different types of grass and weeds, clods of earth, stones, impurities, etc. can be found. The passage of the harvested mass through the devices of the combine in the working process causes wear on the working surfaces of the parts of the combine. The most common wear mechanism is abrasion, and along with it, corrosion and surface fatigue also appear. The parts of the mowing device and the device for processing crop residues are the most exposed to wear, and the parts of the threshing device and the device for separating grain from crop residues are somewhat less.

The application of hard layers in protection against wear is a very effective measure. In combine harvesters, hard layers are applied to the parts that are most exposed to wear, such as the knives of the mowing device and the knives for processing the harvest residues, as well as parts of the threshing device (drum and sub-drum) and devices for separating grain from harvest residues (straw shakers and sieves for grain cleaning). The analyzed examples of combine harvester parts, which are the most exposed to wear, show that thermal and thermal-chemical surface modification procedures and coating procedures with hard layers based on metal carbides were used to protect them.

Key words: material wear, wear protection, grain harvester, hard layers

11. POPIS TABLICA

Tablica 1.	Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije	str. 8
Tablica 2.	Tvrdoće tehničkih materijala	str. 9
Tablica 3.	Postupci oplemenjivanja površina	str. 10

12. POPIS SLIKA

Slika 1.	Jedinični događaj abrazije	str. 2
Slika 2.	Teorijski model abrazije	str. 3
Slika 3.	Jedinični događaj adhezije	str. 4
Slika 4.	Jedinični događaj tribokorozije	str. 4
Slika 5.	Jedinični događaj umora površine	str. 5
Slika 6.	Usporedba osnovnih mehanizama trošenja	str. 6
Slika 7.	Srodni oblici trošenja	str. 7
Slika 8.	Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina	str. 11
Slika 9.	Izgled različitih tipova prevlaka pod mikroskopom	str. 12
Slika 10.	Grafički prikaz različitih vrsta prevlaka	str. 21
Slika 11.	Žitni kombajn Deutz-Fahr serije C7000	str. 19
Slika 12.	Glavni sklopovi žitnog kombajna	str. 20
Slika 13.	Shematski prikaz uređaja za košnju	str. 21
Slika 14.	Shematski prikaz vršidbenog uređaja	str. 22
Slika 15.	Uređaj za odvajanje zrna od žetvenih ostataka	str. 23
Slika 16.	Dijelovi sustava povratne mase kombajna „Rostselmash“	str. 25
Slika 17.	Uređaj za obradu žetvenih ostataka	str. 25
Slika 18.	Trošenje razdjeljivača (a), noževa i prstiju kose (b)	str. 27
Slika 19.	Trošenje spirale (a) i gibljivih prstiju (b) pužnice	str. 28
Slika 20.	Trošenje bubnja (a) i podbubnja (b)	str. 28
Slika 21.	Trošenje slamotresa (a) i gornjeg rešeta (b)	str. 29
Slika 22.	Trošenje noževa (a) i vodećih ploča razbacivača	str. 29
Slika 23.	Indukcijski kaljeni noževi	str. 30
Slika 24.	Borirani, nitrirani i nitrokarburirani noževi	str. 31
Slika 25.	Noževi s tvrdim slojem na bazi WC/Ni materijala	str. 31
Slika 26.	Dijelovi žitnih kombajna s tvrdim karbidnim slojem protiv trošenja	str. 32
Slika 27.	Nož za usitnjavanje žetvenih ostataka ojačan tvrdim slojem	str. 32
Slika 28.	Dijelovi uređaja za košnju izrađeni od Hardox materijala	str. 34

13. POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1.	Troškovi trošenja dijelova kombajna po hektaru žetve	str. 26
Grafikon 2.	Troškovi trošenja dijelova kombajna po toni žitarice	str. 27

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

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

Diplomski rad

Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja dijelova žitnih kombajna

Ivica Božić

Sažetak:

Trošenje materijala prisutno je u svim područjima gospodarstva u kojima se koriste bilo kakva tehnička sredstva koja u svom sastavu imaju dijelove u gibanju. Poljoprivreda u svojoj osnovnoj djelatnosti, proizvodnji poljoprivrednih dobara, primjenjuje brojnu mehanizaciju koja je tijekom eksploatacije izložena različitim oblicima trošenja, ovisno o uvjetima i dinamici rada, te okruženju u kome funkcionira. Najzastupljeniji oblik trošenja u poljoprivredi je abrazijsko trošenje česticama tla, a najviše su mu izloženi strojevi i uređaji za obradu tla. Troškovi trošenja materijala radnih dijelova i posljedice koje mogu nastati uslijed trošenja u poljoprivredi, koja je djelatnost sezonskog karaktera, mogu biti izrazito nepovoljni po njezinu ukupnu ekonomsku učinkovitost. Kombajn je u svom radu tijekom žetve u neposrednom kontaktu sa žetvenom masom u kojoj se, osim žetvenih biljaka, može naći različitih vrsta trave i korova, grumenja zemlje, kamenja, nečistoća itd. Prolazak žetvene mase kroz uređaje kombajna u radnom procesu uzrokuju pojavu trošenja na radnim površinama dijelova kombajna. Najzastupljeniji mehanizam trošenja je abrazija, a uz nju još se pojavljuju korozija i umor površine. Trošenju su najizloženi dijelovi uređaja za košnju i uređaja za obradu žetvenih ostataka, a nešto manje dijelovi vršidbenog uređaja i uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka. Primjena tvrdih slojeva u zaštiti od trošenja vrlo je učinkovita mjera. Kod kombajna se tvrdi slojevi primjenjuju na dijelovima koji su najviše izloženi trošenju, poput noževa uređaja za košnju i noževa za obradu žetvenih ostataka, te dijelovima vršidbenog uređaja (bubanj i podbubanj) i uređaja za odvajanje zrna od žetvenih ostataka (slamotresi i rešeta za čišćenje zrna). Analizirani primjeri dijelova kombajna, koji su najizloženi trošenju, pokazuju da su za njihovu zaštitu primjenjivani toplinski i toplinsko-kemijski postupci modificiranja površine te postupci prevlačenja tvrdim slojevima na bazi metalnih karbida.

Rad je izrađen pri: Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Mentor: prof. dr. sc. Goran Heffer

Broj stranica: 44

Broj slika: 28

Broja tablica: 3

Broj literaturnih navoda: 47

Broj priloga: -

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: trošenje materijala, zaštita od trošenja, žitni kombajn, tvrdi slojevi

Datum obrane:

Stručno povjerenstvo za obranu:

1. izv. prof. dr. sc. Vjekoslav Tadić, predsjednik
2. prof. dr. sc. Goran Heffer, mentor
3. dr.sc. Ivan Vidaković, 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

Application of hard layers in wear protection of combine harvester parts

Ivica Božić

Abstract:

The wear of materials is present in all areas of the economy in which any technical means are used that have moving parts in their composition. Agriculture in its basic activity, the production of agricultural goods, uses numerous machinery that is exposed to various forms of wear during exploitation, depending on the conditions and dynamics of work, and the environment in which it functions. The most represented form of wear in agriculture is abrasive wear by soil particles, and machines and devices for tillage are most exposed to it. The costs of material wear of working parts and the consequences that may arise as a result of wear in agriculture, which is a seasonal activity, can be extremely unfavorable for its overall economic efficiency. In its work during the harvest, the harvester is in direct contact with the harvested mass, in which, in addition to harvested plants, different types of grass and weeds, clods of earth, stones, impurities, etc. can be found. The passage of the harvested mass through the devices of the combine in the working process causes wear on the working surfaces of the parts of the combine. The most common wear mechanism is abrasion, and along with it, corrosion and surface fatigue also appear. The parts of the mowing device and the device for processing crop residues are the most exposed to wear, and the parts of the threshing device and the device for separating grain from crop residues are somewhat less. The application of hard layers in protection against wear is a very effective measure. In combine harvesters, hard layers are applied to the parts that are most exposed to wear, such as the knives of the mowing device and the knives for processing the harvest residues, as well as parts of the threshing device (drum and sub-drum) and devices for separating grain from harvest residues (straw shakers and sieves for grain cleaning). The analyzed examples of combine harvester parts, which are the most exposed to wear, show that thermal and thermal-chemical surface modification procedures and coating procedures with hard layers based on metal carbides were used to protect them.

Thesis performed at: Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

Mentor: prof. dr. sc. Goran Heffer

Number of pages: 44

Number of figures: 28

Number of tables: 3

Number of references: 47

Number of appendices: -

Original in: Croatian

Key words: material wear, wear protection, grain harvester, hard layers

Thesis defended on date:

Reviewers:

1. izv. prof. dr. sc. Vjekoslav Tadić, president
2. prof.dr.sc. Goran Heffer, mentor
3. dr.sc. Ivan Vidaković, member

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