

Tribologija u obradi metala trenje, trošenje i podmazivanje

Lončarić, Ivo

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:980466>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

IVO LONČARIĆ

**TRIBOLOGIJA U OBRADI METALA TRENJE, TROŠENJE I
PODMAZIVANJE**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, rujan 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**TRIBOLOGIJA U OBRADI METALA TRENJE, TROŠENJE I
PODMAZIVANJE
TRIBOLOGY IN METAL PROCESING FRICTION, WEAR,
LUBRICATION
ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Tehnologija materijala i obrade

Mentor/komentor: dipl. ing. Nikola Tomac

Student/studentica: Ivo Lončarić

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 011207577

Rijeka, rujan 2021.

Ivo Lončarić

Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112072577

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom TRIBOLOGIJA U OBRADI METALA TRENJE, TROŠENJE I PODMAZIVANJE izradio samostalno pod mentorstvom dipl. ing. Nikole Tomca.

U radu sam primijenio metodologiju izrade znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:
(*zaokružiti jedan ponuđeni odgovor*)

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Ivo Lončarić

Ivo Lončarić

(potpis)

Ime i prezime: Ivo Lončarić

Sažetak

Upotrebom, materijali se troše, posebice na spojevima koji međusobno dolaze u dodir. Pri tome dolazi do trenja i habanja. Kako bi se produžilo trajanje materijala u strojarstvu istražuju načini i metode kojima se umanjuje negativno djelovanje trenja i habanja na materijale. U tu svrhu pojavljuje se tribologija koja predstavlja proučavanje tehnologija međusobnog djelovanja površine u relativnom kretanju i obuhvaćenom proučavanju i primjenu trenja, trošenja, podmazivanja i srodnih aspekata dizajna. Zahvaljujući istraživanjima u tribologiji razvijaju se maziva i primjene različitih materijala kojima se smanjuje negativan utjecaj trenja i habanja na trajnost materijala. U suvremenoj primjeni sve više pojavljuju se supermazivi koji značajno proizvode komponentu vijeka.

Ključne riječi: održavanje komponenata strojeva, tribologija, maziva, trenje, habanje

Abstract

By use, materials are worn, especially on joints that come into contact with each other. This causes friction and wear. In order to prolong duration of materials in engineering, ways and methods are investigated that reduce the negative effect of friction and wear on materials. To this end, a tribology is emerging that represents the study of surface interaction technologies in relative motion and encompassed the study and application of friction, wear, lubrication, and related design aspects. Thanks to research in tribology, lubricants and applications of various materials are being developed which reduce the negative impact of friction and wear on the durability of materials. In modern applications, super lubricants are increasingly appearing that significantly produce a lifetime component.

Keywords: maintenance of machine components, tribology, lubricants, friction, wear

Sadržaj

1. Uvod.....	2
2. Osnovne odrednice tribologije	3
2. 1. Definiranje i razvoj tribologije.....	3
2. 2. Tribološki sustav.....	6
3. Teorijske osnove trenja	8
4. Teorijske osnove habanja	12
5. Maziva i njihov značaj u tribologiji	17
6. Suvremena primjena tribologije	22
6. 1. Supermaziva.....	24
6. 2. Biotribologija.....	26
6. 3. Tribologija visokih temperatura.....	27
7. Zaključak.....	30
Literatura	31
Popis grafova.....	32
Popis slika	33

1. Uvod

Tribologija je znanost i tehnologija međusobnog djelovanja površina u relativnom kretanju i poznata je pod nazivom proučavanje trenja, trošenja i podmazivanja. Znanost je i tehnologija podmazivanja i trošenja trenjem i od velike je važnosti za očuvanje materijala i energije. To je staro znanje od velike važnosti kada je u pitanju sve u pokretu, ali kao znanstvena disciplina tribologija je prilično nova. Tribologija, iako jedna od najstarijih inženjerskih disciplina, jedna je od najmanje razvijenih klasičnih znanosti do danas. Razlog je taj što tribologija nije doista niti jedna disciplina niti je dobro predstavljaju stacionarni procesi. Uključuje sve složenosti materijala.

Temeljni predmeti proučavanja u tribologiji su tribološki sustavi, koji su fizički sustavi dodirnih površina. Također, tribologija se fokusira na promatranje učinaka trenja, pojave habanja i učinkovitosti maziva u smanjenju trenja i habanja. Zahvaljujući spomenutim istraživanjima moguće je utvrditi metode kojima se mogu poboljšati svojstva materijala i produžiti njihov vijek.

Predmet ovog rada jest uloga i značaj tribologije u strojarstvu, s posebnim fokusom na temeljne elemente tribologije: trenje, habanje i podmazivanje.

Cilj rada jest utvrditi najvažnije karakteristike tribologije i prepoznati najvažnije korake suvremene tribologije kojima se povećava kvaliteta materijala i smanjuje nepotrebna potrošnja energije u strojarstvu.

Pri pisanju rada korištene su znanstvene metode analize, sinteze, komparacije i deskripcije.

2. Osnovne odrednice tribologije

Generička riječ tribologija, izvedena je iz grčkog jezika proizlazi iz glagola *trivein* koji se i sam temeljio na riječi *pedo*, što znači „oblikovanje karaktera privilegirane djece od strane njihovih kućnih učitelja“ (*pedotriveis*). *Trivein* je značio trljanje u kontekstu oblikovanja osobnosti ove djece. Pojam u strojarstvu nastao je 1964. godine kako bi se pronašli načini smanjenja neugodnih učinaka trenja na britansku industrijsku ekonomiju. Odbor je izumio riječ tribologija kako bi naglasio znanstvenu prirodu proučavanja interakcija čvrstih dodirnih površina u relativnom kretanju, koje su obuhvaćene trima disciplinama trenja, podmazivanja i habanja, čineći tako prefiks -tri prikladnim. Trenje se može smatrati dijelom fizike ili strojarstva, podmazivanje pokriva strojarstvo i kemiju, dok je habanje dio znanosti o materijalima.

2. 1. Definiranje i razvoj tribologije

Pokuša li se definirati tribologija, najčešća definicija je ona prema kojoj je tribologija znanost koja proučava pojave i procese na površinama u međusobnom djelovanju, neposrednom ili posrednom dodiru i relativnom gibanju. Osnove tribologije počivaju na pojavi trenja do kojeg dolazi na dodirnim površinama i habanja koje je posljedica tog trenja. Habanje odnosno trošenje površina pojava je zbog koje je potrebno pronaći metode kojima će se smanjiti oštećenje materijala i upravo je to zadatak proučavanja u tribologiji (Ivušić, 1998, str. 13).

Trenje se pojavljuje kao mehanički otpor odnosno kao sila koja ometa ili sprečava relativno gibanje tijela u međusobnom dodiru. Sila trenja djeluje na tijelo suprotno od relativne brzine gibanja. Trenje se također javlja i pri relativnom gibanju čestica unutar krutih materija, tekućina i plinova. Kako bi se savladalo trenje koristi se energija koja se pretvara u toplinu. Toplina se potom prenosi na dijelove u dodiru uslijed čega dolazi do zagrijavanja. Količina trenja ovisna je o stupnju iskoristivosti n mehaničkog sustava pri čemu n predstavlja omjer izlazne i ulazne mehaničke energije odnosno snage. Brzinu habanja određuje trajnost konstrukcijskih elemenata. Prema tome, tribološki procesi uzrokuju promjene u karakteristikama mehaničkih sustava uslijed rada i dovode do oštećenja elemenata uključenih u rad (Križan, 2008, str. 316).

Praktična primjena strojeva pokazuje kako do kvarova dolazi veoma često uslijed triboloških procesa, značajno češće nego uslijed statičkih ili zamornih lomova. Uslijed toga je značajno primijeniti spoznaje iz tribologije pri konstrukciji i korištenju strojeva te posebice pri redovitom održavanju istih. S obzirom na činjenicu kako se uslijed trenja dio mehaničke energije pretvara u toplinsku energiju koja se potom prenosi na okolinu tj. dolazi do gubitka energije, tada postaje vidljivo kako će smanjenje trenja dovesti do smanjenja iscrpljivanja i posljedično trošenja materijala ali i smanjenja potrošnje energije.

Slika 1: prekomjerno zagrijavanje kao nuspojava trenja



Izvor: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf> (21. 05. 2021.)

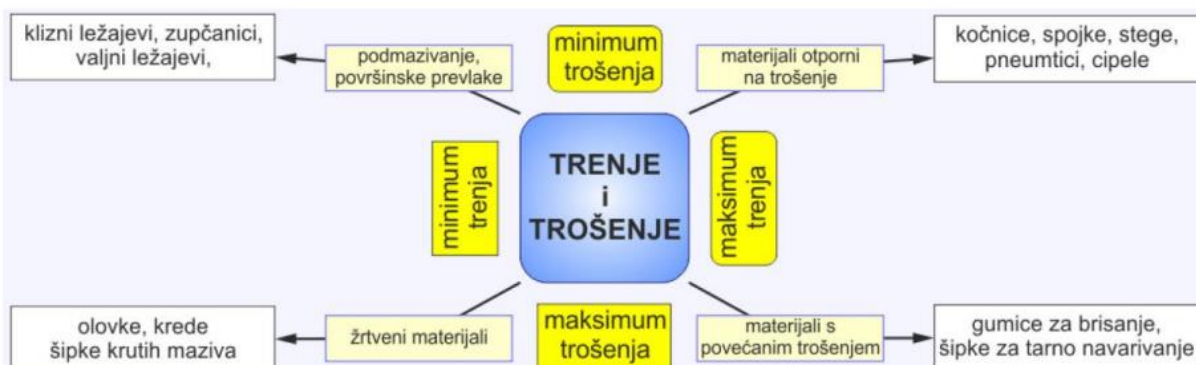
Posljednjih godina istraživačke aktivnosti na polju tribologije naglo su rasle i u pogledu opsega trenja ali i mogućnosti smanjenja trenja kroz primjenu različitih maziva. Kao rezultat toga, publikacije o eksperimentalnom i teoretskom istraživačkom radu enormno su se povećale u raznim akademskim časopisima, pokrivajući fiziku, kemiju, površinske znanosti, nanotehnologiju, znanost i inženjerstvo materijala, biomedicinsko inženjerstvo, kao i strojarstvo i proizvodno inženjerstvo.

Tribologija je prema tome multidisciplinarnar naravi, a uključuje strojarstvo (posebno strojne elemente kao što su ležajevi i zupčanici sa zupčanicima i zupčanicima), znanost o materijalima s istraživanjima otpornosti na habanje, površinsku tehnologiju s analizom površinske topografije i premaza te kemiju maziva i aditiva. Relativno mlađe discipline tribologije su (Bhushan, 2013, str. 21):

- bio-tribologija, koja uključuje (između ostalih tema) trošenje, trenje i podmazivanje ukupne zamjene zgloba i
- nano-tribologiju, gdje se trenje i habanje proučavaju na mikro- i nano-česticama.

U bilo kojem stroju postoji puno dijelova među kojima dolazi do trenja (ležajevi, zupčanici, brežuljci, gume, kočnice, klipni prsten itd.). Ponekad je poželjno imati malo trenje, jer to dovodi do uštede energije ali u nekim slučajevima trenje je poželjno, kao u slučaju kočnica. Tribologija pronalazi primjenu u svim industrijskim sektorima.

Slika 2: utjecaji i podjela tribologije



Izvor: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrošenjeIPodmazivanje.pdf> (21. 05. 2021.)

Zbog tehnološkog napretka, očuvanje materijala i energije postaje sve važnije. Habanje je glavni uzrok gubljenja materijala, pa svako smanjenje habanja može utjecati na znatne uštede. Trenje je glavni uzrok rasipanja energije i poboljšane kontrole trenja mogu postići značajne uštede. Podmazivanje je najučinkovitije sredstvo za kontrolu trošenja i smanjenja trenja.

Sukladno značaju smanjenja trenja u strojevima i samim time smanjenja energije, može se zaključiti kako je primarna namjena tribologije uvođenje tvari između dodirnih površina pokretnih dijelova radi smanjenja trenja i odvođenja topline. Odabir najboljeg maziva i razumijevanje mehanizma kojim on djeluje za razdvajanje površina u ležaju ili drugim dijelovima stroja glavno je područje za proučavanje tribologije (Ivušić, 1998).

Podmazivanje se vrši kako bi se smanjilo trenje između dviju uzajamno djelujućih površina u relativnom kretanju. Do trenja dolazi jer čvrsta površina nikada nije mikroskopski glatka. Čak i najbolje obrađena površina ima vrhove i doline zvane "hrapavost". Kad dvije takve površine dođu u kontakt, stvarni kontakt stvaraju samo vrhovi na površinama. Ti kontakti podržavaju normalno opterećenje i plastično se deformiraju i hladno zavaruju. Ovisno o veličini normalnog opterećenja, sve više i više visokih točaka ili vrhova dolazi u kontakt i 'stvarno područje' dodira povećava se za razliku od 'prividnog područja', što je geometrijsko područje dodirnih površina. Taj se fenomen naziva adhezija.

Vjeruje se da je ovo prljanje uzrokovano trenjem. Kad se dvije takve površine moraju pomicati u odnosu jedna na drugu, potrebna je neka sila da bi se ti kontakti preusmjerili. Ta sila naziva se sila trenja. Tribologija pomaže u konceptualnoj vizualnoj vizualizaciji problema trenja, trošenja i podmazivanja uključenih u relativno kretanje između površina.

Tribologija je složena znanost s malim mogućnostima za teoretske izračune trenja i trošenja. Stoga je tribologija snažno povezana s praktičnom primjenom koja razradni rad i empirijsko iskustvo čine dragocjenima. Tribološka svojstva su od najveće važnosti za materijale u kontaktu, a sustav je osjetljiv na radne uvjete i okoliš. Optimizacijom trenja i trošenja u tehnološkim primjenama, poput dijelova stroja ili u sustavima za obradu metala, može se uštedjeti i okoliš i troškovi.

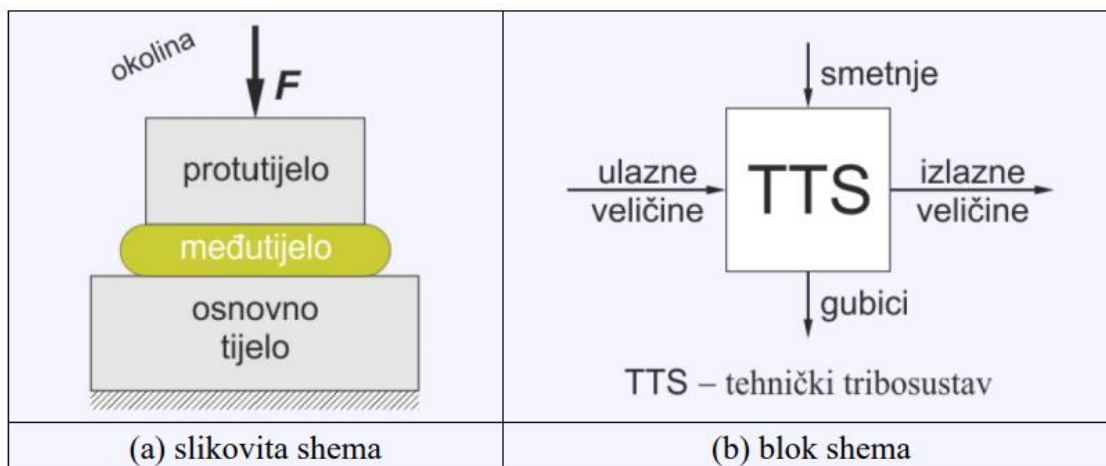
2. 2. Tribološki sustav

Tri su temeljne komponente koje se pojavljuju u tribološkom sustavu, to su (Ivušić, 1998, str. 11):

- osnovno tijelo koje predstavlja temeljni element stroja iz perspektive trošenja (klizna staza vodilice, grabilica bagera i dr.).
- Protutijelo odnosno unutar zatvorenih strojnih sustava u pravilu strojni element (rukavac vratila, klizna prizma vodilice) dok kod otvorenih strojnih sustava čini tijelo u stalnoj promjeni (prešani komadi, stijene).
- Međutijelo, odnosno „treće tijelo“ koje se pojavljuje u prostoru između glavnog tijela i protutijela (sredstvo za podmazivanje, abrazivno sredstvo).

Osim navedenih elemenata, kako bi se moglo ostvariti optimalne rezultate prilikom rješavanja triboloških problema trenja, habanja i podmazivanja, mora se uzeti u obzir opterećenje, F , silu trenja, smjer gibanja, protok kroz sustav (gibanje, energija, materijali, informacije), kao i razne druge čimbenike poput smetnji i gubitaka do kojih dolazi uslijed trenja odnosno habanja (Kovačević & Vrsaljko, 2020, str. 8). Shematski prikaz tribološkog sustava prikazan je na slici u nastavku:

Slika 3: shematski prikaz tribološkog sustava



Izvor: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrošenjeIPodmazivanje.pdf> (21. 05. 2021.)

Uloga elemenata koji se nalaze unutar tribološkog sustava ili koji značajno djeluju na mora biti razumljiva za optimalno djelovanje i dugotrajnu pouzdanost i ekonomsku opravdanost. U većini slučajeva do trošenja dolazi preko površinskih interakcija na neravninama te se upravo na ta područja u proučavanja tribološkog sustava mora staviti posebna pozornost.

3. Teorijske osnove trenja

Trenje se može definirati kao otpor kretanju tijela o drugo i od najveće je važnosti u postupcima obrade metala. Trenje nije materijalni parametar, već odziv sustava u obliku reakcijske sile. Ovisi na pr. temperatura, vlaga, opterećenje, mehanička svojstva i topografija površine. Općenito zakon trenja, poznat kao Amonton-Coulombov zakon, koeficijent trenja (M) opisuje kao odnos sile trenja F_t (tangencijalna sila) i normalne sile F_n (opterećenja) (Bhushan, 2013).

$$M = F_t / F_n$$

Pretpostavlja se da je ovaj zakon točan u tribološkim kontaktima s uobičajenim kontaktnim pritiscima (kao što je većina kontakata oko njega) i često se naziva Coulombovim trenjem.

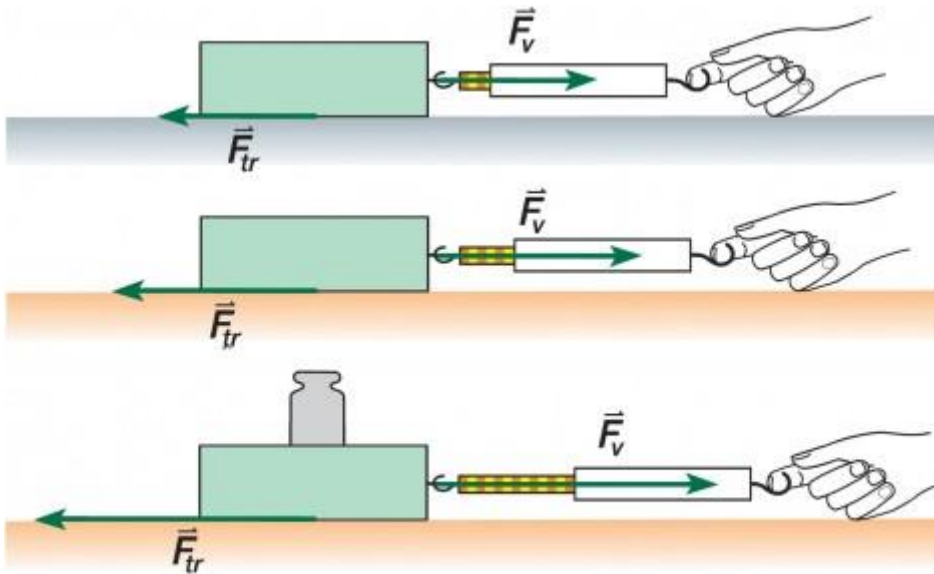
Posljedice trenja su (Križan, 2008, str. 317):

- Zagrijavanje na mjestu dodira
- „gubitak“ mehaničke energije koja se pretvara u toplinu,
- Moguća dodatna toplinska naprezanja u dijelovima koji se dodiruju
- Habanje dodirnih površina
- Povećani šum tijekom rada
- Promjena fizikalnih svojstava površine

Važno je napomenuti kako trenje nije izvorna sila, već čini silu koja nastaje kao reakcija djelovanja neke druge sile. Čine ga elektromagnetne sile koje se pojavljuju između atoma. U trenutku kad površine koje su u kontaktu počnu pomicati u relativno suprotnim smjerovima, dolazi do pojave trenja između navedene dvije površine pri čemu se kinetička energija pretvara u termalnu energiju.

Trenje uvijek djeluje u smjeru suprotnom od smjera u kojem se objekt kreće ili se pokušava pomaknuti. Trenje uvijek usporava pokretni predmet. Količina trenja ovisi o materijalima od kojih su izrađene dvije površine. Što je površina hrapavija, stvara se više trenja. Trenje također proizvodi toplinu. Pojava sile trenja prikazana je na slici u nastavku:

Slika 4: shematski prikaz djelovanja sile trenja



Izvor: http://www.medioteka.hr/portal/print.php?tb=ss_fzk2&vid=6 (21. 05. 2021.)

U većini slučajeva u strojarstvu i strojarskim sustavima pojava trenja je štetna i zadaća tribologije je maksimalno smanjiti trenje i tako produžiti trajanje elemenata. Najčešće se u praksi u strojarskim konstrukcijama trenje pojavljuje u (Ivušić, 1998, str. 31):

- Ležajevima i vodilicama
- Zupčastim i lančanim prijenosnicima snage i gibanja
- Između alata i izratka
- Prilikom protjecanja fluida kroz cijev (pri tome je zagrijavanje fluida zanemarivo)

Ipak u strojarstvu se pojavljuju i slučajevi u kojima je trenje funkcionalno neophodno, a to je prvenstveno (Križan, 2008, str. 317):

- Vijčani spojevi
- Stezni spojevi
- Kočnice i tarne spojke
- Remenski i tarni prijenosnici snage i gibanja
- Prilikom kontakta kotača s podlogama

Tri su temeljna razloga zbog kojih dolazi do pojave trenja pri relativnom klizanju dviju suhих površina čvrstih tijela. Prvi uzrok je adhezija odnosno privlačna sila koja se pojavljuje između čestica dva tijela u dodiru. Drugi uzrok je pojava hladno zavarenih mikrospojeva, pri čemu se zavarivanje zbiva na mjestima na kojima se velike sile prenose preko veoma malih površina. Pri tome dolazi do pojave velike topline u jednoj točki te se ta toplina ne može procesom prevođenja dovoljno brzo odvesti u okolni materijal uslijed čega se pojavljuje taljenje a potom i skrućivanje odnosno spajanje vrhova neravnine u dodirnoj točki. Pri tome gotovo u istom trenutku pojavljuje se prekid zavarenog spoja. Kako bi se ostvarilo klizanje jedne površine po drugoj, potrebno je primijeniti silu koja će nadvladati adheziju i izvršiti prekid na zavarenom mjestu. Treći je uzrok pojave trenja prilikom klizanja brazdanje mekše površine neravninama tvrđe površine pri čemu vrhovi tvrdog tijela zapinju za vrhove neravnina mekšeg tijelate pri žilavim materijalima dolazi do plastične deformacije a kod krhkih materijala dolazi do loma. Deformiranje i lomovi također dodatno povećavaju potrošnju energije zbog potrebnog djelovanja sile (Križan, 2008, str. 318).

Postoje razne vrste trenja, koje uključuju statičko, kotrljajuće, kinetičko, klizno i fluidno trenje. Statičko trenje je trenje prisutno između dva predmeta koji se nemaju relativno kretanje, poput bloka drva koji je ostao na stolu. Trenje kotrljanja opisuje silu trenja koja postoji kad se jedan predmet kotrlja po drugoj površini, poput one koja se javlja kada se kotači automobila kreću prema ulici. Kinetičko trenje je trenje koje nastaje kad se dva predmeta u dodiru pomaknu jedan prema drugom i trljaju zajedno, poput onog koji bi se dogodio kada dijete padne niz tobogan. Trenje klizanja događa se kada jedan predmet klizi po površini drugog, poput drvenog bloka koji klizi po stolu kad se gurne. Konačna vrsta trenja, trenje tekućine, javlja se kada se čvrsti predmet kreće kroz tekućinu ili plin, poput onog koji se događa kada zrakoplov leti.

U kliznom stanju obično je potrebno pratiti ili izračunati ponašanje trenja tijekom eksperimenta. Promjene trenja s podacima o trošenju obično nude korisne podatke o modeliranju i mehanizmima. Trenje se obično klasificira u dvije kategorije (Bhushan, 2013):

- statičko trenje i
- dinamičko trenje.

U slučaju da se dva predmeta međusobno ne klize, naziva se statičko trenje. S druge strane, oba parenja koja se međusobno klize relativno nazivaju se dinamičkim trenjem. Dok je dinamičko trenje svako trenje do kojeg dolazi kad se neki predmet pomiče po površini drugog predmeta, statičko trenje je zapravo također oblik trenja do kojeg dolazi djelovanjem druge sile, ali ta sila nije dovoljna da pomakne objekt. Prema tome, statičko trenje onemogućava klizanje koje pokušavaju uzrokovati druge sile svojim djelovanjem. Primjerice, ukoliko se nastoji gurati automobil nedovoljno snažnom silom, statičko trenje onemogućiti će njegovo pomicanje. Pri tome statičko trenje djeluje na automobil jednakom silom kojom se djeluje da se pokuša ga pomaknuti, ali u suprotnom smjeru. Kad se objekt pomakne, tada je sila kojom se pomiče postala jača od sile statičkog trenja.

4. Teorijske osnove habanja

Habanje odnosno trošenje predstavlja površinska oštećenja do kojih dolazi pri konstrukcijskim elementima. U pravilu se definira kao progresivni proces koji uzrokuje gubitke na materijalima elemenata strojeva uslijed njihovog međusobnog neposrednog kontakta te relativnog kretanja između dva elementa (najčešće je riječ o kretanju jednog elementa uz dodirivanje ili prijenos kretanja na drugi element, primjerice kod zupčanika). Posljedica procesa habanja jest potrošenost strojnih elemenata, smanjenje njihove učinkovitosti u radu povećana potrošnja energije itd. Uslijed habanja čestice materijala odnose se s površine djelovanjem drugih tijela na materijal. Veličina habanja izražava se kvantitativno kao (Ivušić, 1998, str. 43):

- promjena geometrije primjerice smanjivanjem promjera Δd
- smanjenje volumena ΔV
- smanjenje mase Δm

Shematski prikaz habanja do kojeg dolazi uslijed trenja pomičnog elementa o drugi prikazan je na slici u nastavku:

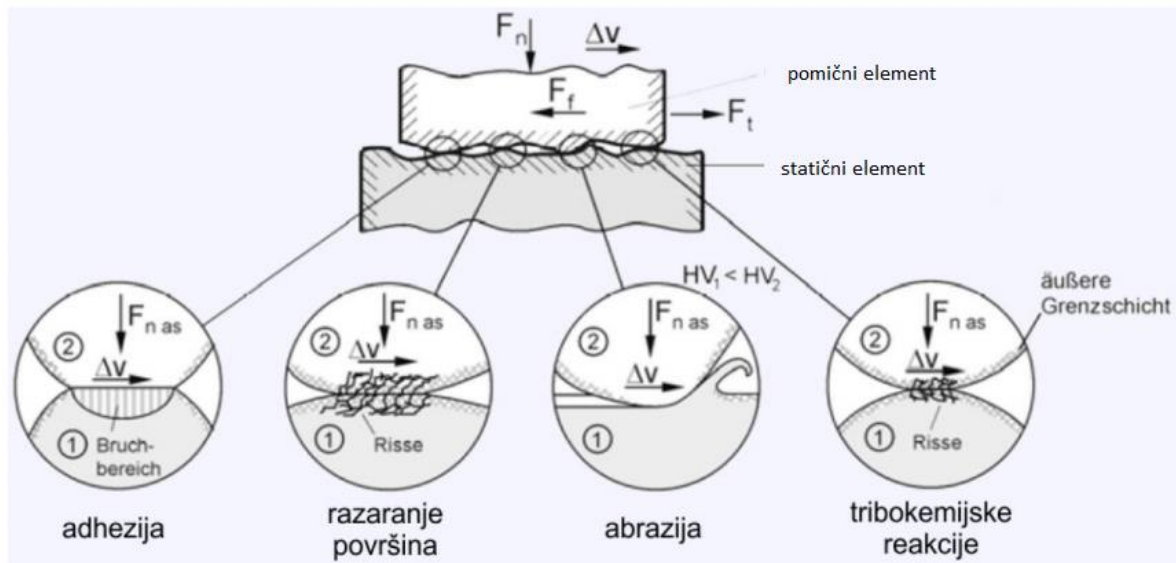
Slika 5: shematski prikaz nastanka habanja



Izvor: <http://www.maziva.org/podmazivanje/tribologija/> (12. 06. 2021.)

Habanje se događa tijekom protoka vremena, pri čemu se dijeli na habanje tijekom uhodavanja, stacionarno habanje i progresivno habanje. Uročnici habanja su adhezija, abrazija, površinski zamor materijala, erozija, kavitacija i korozija. Na konstrukcijski element može djelovati jedan ali i više uzročnika habanja istovremeno (Križan, 2008, str. 323).

Slika 6: prikaz različitih vrsta habanja ovisno o uzročnicima



Izvor: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf> (12. 06. 2021.)

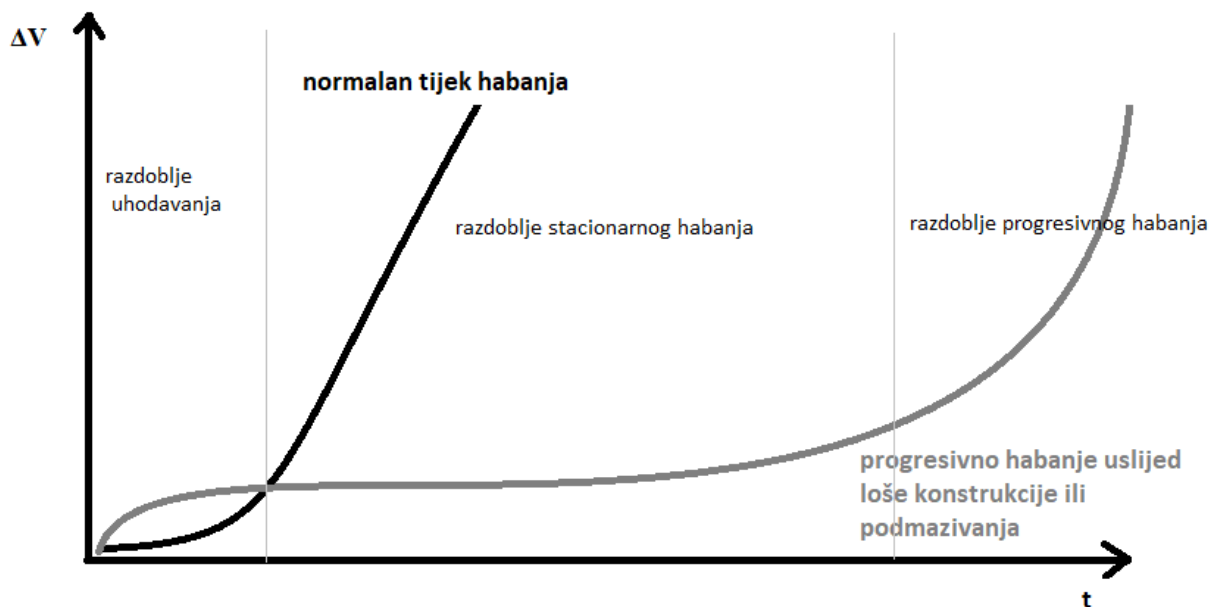
Najčešće se na početku djelovanja dva materijala jedan na drugi događa habanje tijekom uhodavanja koje je posebno izraženo na početku a s vremenom je sve manje, jer se materijali međusobno prilagođavaju. Primjerice, dobro podmazani klizni ležaj prevelike hrapavosti na početku će imati habanje sve dok se pretjerana hrapavost ne izliže. Tijekom tog početnog perioda previsoki vrhovi neravnina hrapavosti će se odrezati a površine zagladiti pa će u ležaju doći do tekućeg trenja i posljedično značajno manjeg habanja.

U razdoblju uhodavanja stroj se ne smije maksimalno opteretiti i ne smiju se koristiti maksimalne brzine. Također je potrebno češće mijenjati mazivo kako bi se uklonio talog čestica materijala koji se sakuplja na mazivu.

Stacionarno habanje pojavljuje se kod dobro konstruiranih i podmazanih elemenata nakon razdoblja uhadavanja u razdoblju normalne eksploatacije. Karakterizira ga jednoliko i sporo odnošenje čestica materijala s površine. Što je nagib pravca koji prikazuje stacionarno habanje manji, trajnost elemenata biti će veća (Križan, 2008, str. 323).

Progresivno habanje pojavljuje se najčešće nakon dužeg razdoblja stacionarnog habanja, međutim može se pojaviti i odmah na početku korištenja materijala. Pri progresivnom habanju odnošenje čestica materijala s površina ubrzava pa konstrukcijski element uskoro nije u mogućnosti ispunjavati svoju funkciju. Do progresivnog habanja može doći uslijed loše konstrukcije elemenata, nedovoljnog podmazivanja, prevelikih pritisaka među materijalima, zbog zamora materijala ili uslijed intenzivne korozije materijala (Ivušić, 1998, str. 44). Različitost kretanja stacionalnog habanja kod dobre konstrukcije materijala i podmazivanja u odnosu na loše izvedenu konstrukciju materijala ili loše podmazivanje (koje dovodi do progresivnog habanja) prikazano je na grafikonu u nastavku:

Graf 1: Habanje površina protokom vremena



Izvor: samostalna izrada autora prema (Križan, 2008) i (Ivušić, 1998)

Kako bi se smanjilo habanje koriste se različite metode i tehnike za umanjivanje toga procesa a pri tome je najvažnija uloga podmazivanja. Do habanja također manje dolazi ukoliko se

odabiru kvalitetni materijali visoke tvrdoće koji su zbog svojih karakteristika otporni na habanje. Pravilan izbor materijala ovisan je o pogonskim uvjetima u strojevima. Najvažniji čimbenici koji utječu na odabir materijala su brzina, opterećenje, temperatura i pritisak. Usljed toga, za konstrukciju kliznih ležajeva u pravilu se koristi čelik-bronca. Kombinacija čelik-čelik nije posve dobra unatoč visokoj razini tvrdoće jer uslijed visokih temperatura i brzine dovodi do zaribavanja (Astakhov, 2003, str. 12).

Promjena konstrukcije dovodi do zamjene trenja klizanja u trenje kotrljanja što ima za posljedicu smanjenje trenja te pri lošem podmazivanju i smanjenje habanja. U određenim situacijama moguće je sasvim izbjeći habanje, primjerice ukoliko se umjesto dodirne brtve koristi bezdodirna labirintna brtva. Umjesto suhog trenja treba osigurati barem mješovito trenje, a umjesto mješovitog tekuće trenje. Konstrukcijom treba smanjiti sile koje uzrokuju habanje: treba smanjiti površinske pritiske i brzine, treba osigurati dobro podmazivanje i pročišćavanje ulja, što je najvažniji praktični čimbenik u smanjivanju habanja tijekom eksploatacije. Podmazivanje se može poboljšati takvom topografijom klizne površine koja će omogućiti akumulaciju ulja u mnogobrojnim malim udubinama odnosno šupljinama. To se primjerice postiže upotrebom sintranih metala ili obradom površine honanjem. Također se mora paziti na zagrijavanje, jer visoka temperatura dovodi do smanjenja viskoznosti ulja, stanjenja uljnog sloja među površinama i povećane opasnosti od habanja. Stoga je ponekad potrebno dodatno hlađenje ulja za podmazivanje (Križan, 2008, str. 326).

Habanje se također može smanjiti i preciznom izradom konstrukcijskih materijala izmjera i oblika te kvalitetnom obradom površine konstrukcijskih materijala. Pri tome je važno voditi računa o propisanim tolerancijama pri konstrukciji materijala. Postizanje tražene tvrdoće površine postiže se mehaničkim postupcima kao što su sačmarenje ili tlačenje površine, zatim raznim postupcima toplinske obrade kao što su kaljenje, cementiranje, nitiranje, uvođenje galvanskih prevlaka itd.

Posebno je važno spriječiti pojavu korozije ne samo na tribološkim površinama već i na slobodnim površinama koje se nalaze na otvorenom prostoru i potpuno su izložene atmosferskim utjecajima. Korozija se osim oblikovanjem koje omogućava slobodno otjecanje vode, sprečava ili smanjuje sljedećim postupcima (Križan, 2008, str. 327):

- Upotrebom nehrđajućih metala koji su u pravilu skupi (bakar, čelik otporan prema kemijskim utjecajima – inoks, prokron itd.) i umjetnih plastičnih masa (polimeri)
- Premazivanjem površina zaštitnim bojama, lakovima, mastima i uljima
- Nanošenjem prevlaka od cinka, kositra, aluminija, plastike itd.
- Galvaniziranjem, fosfatiranjem, bruniranjem, eloksiranjem, emajliranjem,
- Dodavanjem posebnih antikorozivnih aditiva mazivim uljima
- Dobrim brtvljenjem koje sprečava ulaz vode i vlage
- Katodnom zaštitom

Kako bi se odredila učinkovitost određene metode povezane s korištenim materijalom, provode se testovi habanja i izdržljivosti materijala. U eksplicitnim testovima habanja koji simuliraju industrijske uvjete između metalnih površina, nema jasne kronološke razlike između različitih stupnjeva trošenja zbog velikih preklapanja i simbiotskih odnosa između različitih mehanizama trenja. Površinski inženjering i tretmani koriste se kako bi se minimaliziralo trošenje i produžio radni vijek elemenata.

5. Maziva i njihov značaj u tribologiji

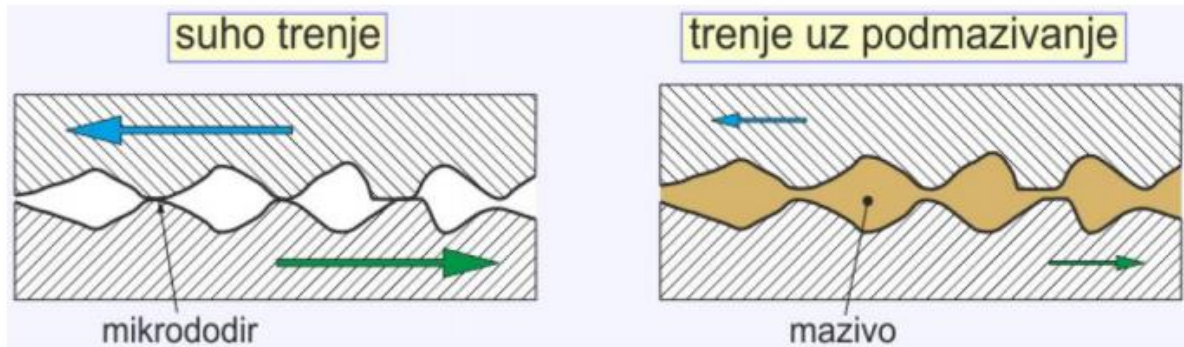
Dvije čvrste komponente odnosno dijelovi koji klize između površina obično se razmatraju kroz maksimalni koeficijent trenja i veću brzinu trošenja zbog svojstava površine kao što su reaktivnost, manja tvrdoća, međusobna topljivost i veća površinska energija. Čiste površine bez hrđe slobodno apsorbiraju tragove drugih tvari iz atmosfere. Uz to, novoproducirane površine obično proizvode manje trošenje i koeficijent trenja u usporedbi s čistim površinama. Međutim, mogu postojati šanse za vanjski materijal na površini rasutog materijala koji može povećati koeficijent trenja tijekom kontinuiranog postupka klizanja. Stoga se maziva mogu primijeniti za smanjenje brzine trošenja i koeficijenta trenja.

Maziva predstavljaju kemijske tvari specifičnih fizikalnih i kemijskih osobina i karakteristika koja se upotrebljavaju za podmazivanje prvenstveno strojeva. Temeljna im je namjena smanjiti trenje između kliznih ploha koje su u međusobnom odnosu odnosno gibanju. Njihova je primarna namjena smanjenje potencijalnih oštećenja koja mogu nastati trošenjem dijelova strojeva, ali isto tako namjena im je i odvođenje topline, ali i zaštita od negativnih utjecaja atmosfere, poput korozije te stvaranja naslaga i taloga zbog oksidacije i drugih kemijskih promjena. Prva maziva koja su bila u primjeni su bila životinjska i biljna ulja te masti. Njihova je primjena bila aktualna sve do prve polovice dvadesetog stoljeća kada je mlada naftna industrija iznijela na tržište maziva ulja dobivena od teških naftnih frakcija. Danas svijest o potrebi očuvanja okoliša i zdravlja utječe i na proizvodnju svih vrsta maziva, tako da se iz njih isključuju sastojci štetni za zdravlje i okoliš, a u pojedinim se područjima rabe i biološki razgradiva maziva na osnovi biljnih ulja ili sintetskih esterskih ulja. Prema agregatnom stanju razlikuju se tekuća maziva (ulja), polučvrsta (mazive masti) i čvrsta maziva (Leksikografski zavod Miroslava Krlež, 2015).

Pojam podmazivanja može se primijeniti na dva različita uvjeta: čvrsto podmazivanje i podmazivanje tekućim filmom (tekuće ili plinovito). U bilo kojoj vrsti materijala korišteno je čvrsto mazivo poput čvrstog filma i praha za zaštitu klizne površine od neočekivanih oštećenja tijekom postupka klizanja i smanjenje brzine trošenja i koeficijenta trenja. Čvrsta maziva korištena su u kliznim aplikacijama. Primjerice, ležaj je radio s malim brzinama i većim opterećenjima, a hidrodinamički podmazani ležajevi zahtijevali su pokretanje i zaustavljanje. Čvrsto mazivo sadrži veću raznolikost materijala koji može proizvesti nižu

brzinu trošenja i koeficijent trenja. Uz to, tvrdi materijali korišteni su i kao mazivo za smanjenje trenja i trošenja u ekstremnoj radnoj atmosferi (Bhushan, 2013).

Slika 7: značaj maziva u sprečavanju mikrododira kod trenja



Izvor: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf> (21. 05. 2021.)

Temeljna osobina maziva jest njihova viskoznost koja predstavlja mjeru unutarnjeg trenja kod maziva. Kako bi se postiglo bolje podmazivanje prilikom velikih okretaja u strojevima, potrebna su maziva koja imaju manju viskoznost, povećanjem opterećenja pojavljuje se potreba za većom viskoznosti maziva. Viskoznost je određena sa temperaturom, povećanje temperature smanjuje viskoznost maziva. Promjena viskoznosti u odnosu na promjenu temperature označuje se indeksom viskoznosti (pri tome su maziva većeg indeksa viskoznosti najčešće manje promjene viskoznosti ovisno o promjeni temperature). Mineralna bazna ulja kao maziva imaju indeks viskoznosti do približno 100, dok se upotrebom raznih aditiva može postići i znatno viši indeks viskoznosti, sve do 200. Sintetska ulja s druge strane imaju veoma visoku viskoznost, koja dosiže razine i preko 200 (Šilić, Stojković, & Mikulić, 2012).

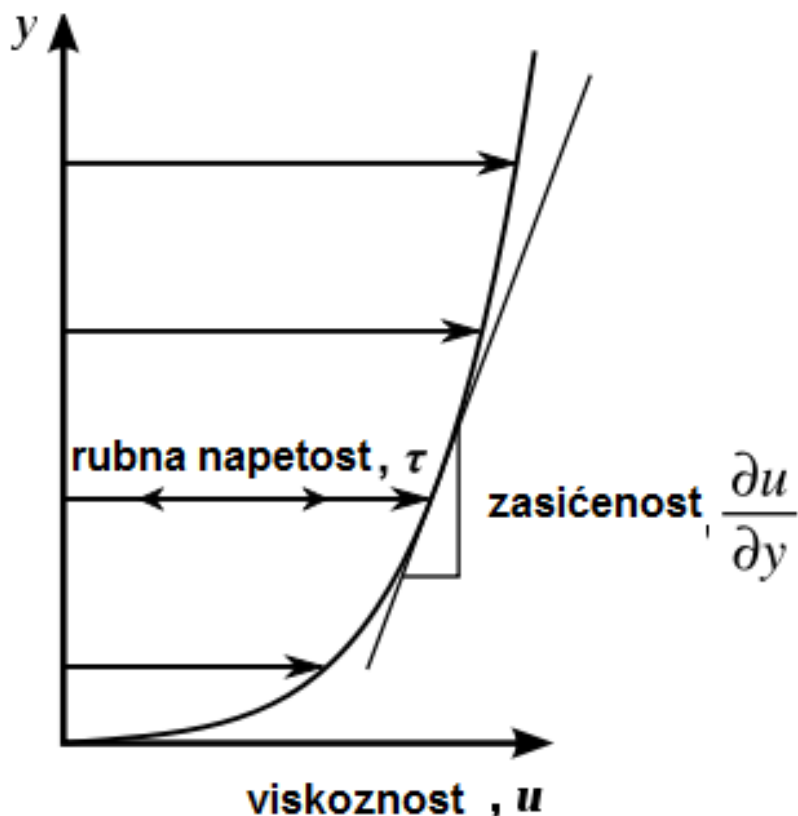
Tekuća maziva najvažnija su vrsta maziva te kao takva imaju i veoma važnu primjenu u avijaciji. Ona se uglavnom sastoje od baznog ulja i aditiva. Bazno ulje može biti mineralno ili sintetsko. Mineralno bazno ulje proizvodi se rafinacijom teških frakcija nafte dobivenih vakuumskom destilacijom na temperaturi višoj od 350 °C i danas čini više od četiri petine od ukupno proizvedenih količina maziva. Maziva ulja mineralne osnove primjenjuju se za podmazivanje većine vozila i strojeva pri normalnim uvjetima rada. Za posebno teške uvjete rada (ekstremno visoke ili niske temperature), težu zapaljivost, dug vijek trajanja i sl.

primjenjuju se maziva koja sadrže sintetska bazna ulja (ugljikovodična, esterska, silikonska i dr.). Aditivima se može smanjiti ovisnost viskoznosti o temperaturi, poboljšati tecivost pri niskim i postojanost pri višim temperaturama, povećati sposobnost zaštite od korozije te čvrstoća mazivoga sloja i time poboljšati podnošenje iznimno velikih tlakova, te smanjiti trošenje strojnih dijelova (Leksikografski zavod Miroslava Krlež, 2015).

Viskoznost se mjeri kao unutarnje trenje u tekućini, što odražava način na koji molekule odolijevaju interakciji u kretanju. To je bitno svojstvo maziva, jer utječe na sposobnost ulja da formiraju sloj za podmazivanje ili utječe na smanjenje trenja te smanjenje trošenja. Do viskoznosti dolazi djelovanjem međumolekulske kohezijske sile u fluidu i adhezijske sile između fluida te krutoga tijela roz koje se zbiva proces strujanja. Pri tome slojevi fluida koji se nalaze uz stijenke cijevi usporavaju kretanje brzih slojeva. Pri tome sila F na jedinicu površine među dva sloja fluida djeluje razmjerno gradijentu relativne brzine v , odnosno razmjerno brzini kojom se relativna brzina gibanja mijenja od sloja do sloja dy (Šilić, Stojković, & Mikulić, 2012):

$$F = -\eta \frac{dv}{dy}$$

U praksi se najčešće mjeri putem Englerovih stupnjeva (oznaka °E) upotrebom posebnog aparata, poznatog kao Englerov viskozimetar. Mjerenje se za neka ulja izvršava kod temperature na kojoj se nalazi ulje za vrijeme rada. Primjerice kod kod ulja za instrumente i vretena važan segment mjerenja viskoziteta jest kod temperature od 20 °C. Kod ulja za strojeve viskoznost se s druge strane mjeri kod 50 °C, a kod motornih i cilindarskih ulja kod 100 °C. Kod zrakoplovnih ulja također se mjeri na temperaturi od 100 °C (Šilić, Stojković, & Mikulić, 2012).



Graf 2: promjena stanja viskoznosti količinom toka (Mortier, Fox, & Orszulik, 2010)

Treba napomenuti kako viskoznost nije ni u kojem smislu povezana sa gustoćom tekućine, unatoč tome što se često pogrešno tumače. Primjerice, tekuća ljepljiva imaju i stotinu tisuća puta veću viskoznost od vode, dok im je gustoća otprilike jednaka s gustoćom vode pri jednakoj temperaturi (Kruz, 1969, str. 64).

Neposredno pred mjerenje ulje se procijedi kroz rupice promjera 0,3 mm. Nakon toga se ulje zagrijava na određenu temperaturu te se potom ulijeva u unutarnju posudu viskozimetra, koja ima na svojem dnu izlaznu cjevčicu koja se zatvara iglom. Dva termometra služe za mjerenje temperature. Nakon toga ulje se ispušta u menzuru od 200 cm³ te se potom mjeri vrijeme koje je bilo potrebno da navedena količina ulja protekne. Potom se to vrijeme podijeli u sekundama, za koje je proteklo 200 cm³ ulja kod određene temperature, sa vremenom u sekundama, tijekom kojega će kroz viskozimetar proteći ista količina, odnosno 200 cm³ destilirane vode kod 20 °C, te se temeljem te računice izračuna viskoznost. Navedena viskoznost ovisna o vodi predstavlja relativnu viskoznost (Totten, 2003).

Osim viskoznosti za maziva je veoma važno svojstvo i oksidacija. Degradacija maziva pri djelovanju oksidativnih mehanizama je potencijalno vrlo ozbiljan problem. Iako određeno mazivo može biti tako formulirano za podmazivanje da može imati brojne poželjne osobine kada je novo, oksidacija može dovesti do dramatičnog gubitka performansi posljedicom reakcija kao što su (Mortier, Fox, & Orszulik, 2010, str. 13):

- korozija zbog formiranja organskih kiselina,
- formiranje polimera koji dovode do mulja i smole,
- promjene viskoznosti,
- gubitak električnog otpora.

Sadržaj sumpora baznih ulja se često smatra kao koristan pokazatelj prirodne otpornosti na oksidaciju. To je prije svega stoga što se putem sumpornih baznih ulja prirodno pojavljuju organosulforni spojevi u sirovoj nafti koji su skromno učinkoviti u uništavanju organskih peroksid međuprodukata i razbijanja mehanizma oksidacijskog lanca. Međutim, učinkovitost ovih prirodnih inhibitora je obično prilično inferiorna u odnosu na sintetizirane dodatke koji mogu biti puno određeniji u svom djelovanju (Mortier, Fox, & Orszulik, 2010, str. 14).

6. Suvremena primjena tribologije

Iako u strojarскоj praksi rasipanje resursa (energije) zbog neznanja triboloških učinaka teško prelazi jednoznamenasti broj, procjenjuje se da je taj otpad približno jedna trećina svjetske potrošnje energije, pa je proučavanje i optimizacija triboloških postupaka od velike važnosti. Ogromne sume novca troše se na istraživanja u tribologiji. Pri tome je zadatak brojnih istraživanja pronaći najoptimalnije metode za minimiziranje i uklanjanje gubitaka koji nastaju uslijed trenja i habanja na svim tehnološkim razinama gdje je trenje površina uključeno. Zahvaljujući primjeni tribologije dolazi se do veće učinkovitosti postrojenja, boljih performansi, manje kvarova i značajnih ušteda. Pri rezanju metala samo 30-50% energije potrebne sustavu rezanja troši se na koristan rad, tj. na odvajanje sloja od obratka. To znači da se 40–75% energije koju sustav za rezanje troši jednostavno troši. Većina ove izgubljene energije troši se na sučeljima alata - ivera i alata - obratka zbog neoptificiranih triboloških procesa. Ova se činjenica može lako uvidjeti ako se shvati da se gotovo sva energija potrošena u procesu rezanja pretvara u toplinsku energiju. Stoga je temperatura određene zone u sustavu rezanja relevantan pokazatelj potrošene energije u toj zoni. To je zato što potrošena energija generira toplinu, pa viša temperatura određene zone ukazuje na veću potrošnju energije u toj zoni. Usporedi li se temperaturu u zoni deformacije i s temperaturom na sučeljima, može se doći do iznenađujućeg, ali dobro poznatog zaključka da je temperatura u zoni deformacije, gdje je glavno djelo plastične deformacije pri odvajanju sloja koji se uklanja s ostatka obratka, relativno je nisko (normalno u rasponu od 80-250 °C), dok su maksimalne temperature na sučelju alat-iver premašile 1000 °C. Stoga se većina energije koja je potrebna sustavu za rezanje troši na sučeljima alat-iver i alat-obradak. Nažalost, ova se jednostavna činjenica godinama zanemaruje, jer zona deformacije privlači puno više pozornosti istraživača s tog područja, a manje pažnje tribološkim aspektima rezanja metala (Astakhov, 2003, str. 121).

Spomenuti gubitak energije potrošene na razmatranim sučeljima smanjuje vijek trajanja alata, utječe na oblik proizvedenog čipa i dovodi do potrebe za uporabom različitih rashladnih medija što, pak, smanjuje učinkovitost obradnog sustava jer je za hlađenje potrebno više energije srednje isporuke i održavanja.

Situacija u rezanju metala potpuno se razlikuje od one u dizajnu triboloških spojeva u modernim strojevima. U potonjem je dizajner prilično ograničen oblikom kontaktnih površina, upotrijebljenim materijalima, radnim uvjetima postavljenim vanjskim radnim

zahtjevima, upotrebom rashladnih i podmazujućih medija, itd. U rezanju metala mogu praktički bilo koji parametri reznog sustava biti različite izvedbe. Suvremeni alatni strojevi ne ograničavaju dizajnera procesa pri odabiru brzina rezanja, dodavanja ili dubine rezanja. Nomenklature materijala za alate, geometrije uložaka za rezanje i držači alata koji su mu na raspolaganju vrlo su široki. Izbor medija za hlađenje i podmazivanje i tehnike njihove primjene praktički su neograničene. Iako se kemijski sastav radnog materijala obično daje onako kako ga je odredio dizajner, svojstva ovog materijala mogu se u širokom rasponu promijeniti toplinskom obradom, kovanjem i uvjetima lijevanja. Jedini problem u odabiru optimalnih parametara tribološkog rezanja je nedostatak znanja o tribologiji rezanja metala. Stoga proučavanje i optimizacija triboloških uvjeta na tim sučeljima imaju velik potencijal u smislu smanjenja energije potrošene na rezanje, povećanog vijeka trajanja alata, smanjenja i uklanjanja rashladnih tekućina itd .

Danas se tribološka istraživanja odvijaju u nano tehnologiji, a značajna grana proučavanja tribološkog sustava je nanotribologija. Nanotribolozi istražuju trenje na nanorazmjeru i koriste to znanje u primjenama poput magnetskih uređaja za pohranu. U Saint-Gobainu radimo s inženjerima na kontroli trenja, osiguravajući da su njihove primjene pouzdane, robusne i vrhunske dugovječnosti. Tribološka istraživanja imaju glavnu ulogu u proizvodnji pouzdanih komponenata. Na primjer, radimo s našim automobilskim klijentima kako bismo stvorili dosljedno kontrolirano trenje koje smanjuje habanje, buku, vibracije i koroziju (Astakhov, 2003, str. 124).

Suvremena primjena tribologije posebno je usmjerena prema razvijanju veoma učinkovitih i dobrih maziva. Dovoljna je vrlo mala količina podmazivanja da se drastično promijeni trenje između dviju površina. U slučajevima kada vrlo tanki film podmazivanja prijanja na površine stvarajući sloj niskog trenja, to je općenito poznato kao granično trenje.

Učinkovitost primijenjenog maziva ovisi o njegovoj viskoznosti, koja se može mijenjati ovisno o radnim uvjetima. Opet, tribologija se primjenjuje na formulaciju maziva, pronalazeći onu presudnu ravnotežu između smanjenja trenja pri klizanju i previsoke viskoznosti.

Podmazivanje se posebno razvilo u posljednje tri godine, uključujući supermazivost, teoriju podmazivanja, nova tekuća maziva i aditive, nove čvrste prevlake i mjerne tehnike. Ova dostignuća pokazuju da se istraživanje tribologije pomiče na novo područje, npr. Pojavljuju se

pojmovi kao što su supermazivost, biopodmazivanje i molekularno podmazivanje. Zelena maziva, maziva niske viskoznosti i maziva za teške uvjete (visoka temperatura, ultra niska temperatura, vakuum i visoki tlak, itd.) Dobili su mnogo pozornosti tijekom posljednjih nekoliko desetljeća (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020, str. 223).

6. 1. Supermaziva

Supermaziva ili superlubrikanti predstavlja sasvim novo područje tribologije koje se najbrže razvija u posljednjih nekoliko godina. Bit će to važna prekretnica u razvoju tehnologije. Ne samo da smanjuje koeficijent trenja za nekoliko redova veličine, već također uvelike smanjuje habanje i buku uzrokovanu trenjem. Stoga se sve više tribologa bavi supermazivima. Veliki napredak postignut je kako u čvrstom, tako i u tekućem razvoju supermaziva.

Diamond-like carbon (DLC) supermaziva, stvorena od ugljika dijamanta, predstavljaju jedno od najistaknutijih čvrstih maziva, još uvijek privlači intenzivnu istraživačku pozornost kod znanstvenih ispitivanja u području tribologije. Glavna postignuća u supermazivosti DLC filma bila su na dva aspekta, a to su maziva u nastajanju na bazi DLC-a i mehanizmi mazivosti povezani s DLC-om. Zahvaljujući zajedničkim naporima istraživača, tijekom godine pojavilo se nekoliko novih vrsta maziva na bazi DLC-a. Kao zajednička briga, sve ove studije rasvjetljuju stanja vezivanja i raspored sp^2 / sp^3 -faza. Samopodmazujući DLC nanokompozitni film in situ tribokemijski je formiran od okolnih ugljikovodika alkohola i alkana na površini nanokristalne legure Pt-Au. Ti su filmovi izuzetno otporni na habanje i nisu podvrgnuti očitom uklanjanju materijala čak ni nakon 100 000 kliznih ciklusa pri kontaktnom tlaku od 1,1 GPa. Još jednu primjenu predstavlja višefazna karbonska prevlaka koja sadrži amorfne i nano-kristalne ugljike metodom raspršivanja magnetronom, koja je pokazala koeficijent ultra niskog trenja 0,05 i malu brzinu habanja od oko $10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{M}^{-1}$ (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020).

Napredujući u tehnikama karakterizacije i simulacijskim metodama, istraživači su sada u mogućnosti istražiti mehanizme mazivosti DLC-a na složeniji način, posebno mogućnost ispitivanja kliznog sučelja i tribo-induciranih proizvoda u atomskom mjerilu ili čak u promatranju u stvarnom vremenu. Pri tome se posebno ističe kritična uloga strukturnih

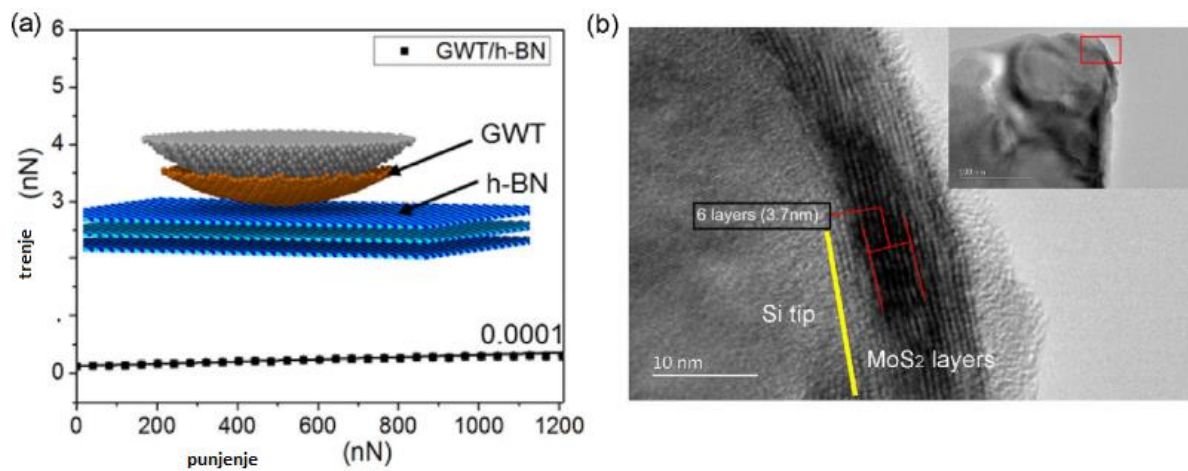
promjena izazvanih tribom i inbo formiranih tribojera u uspostavljanju stanja mazivosti s malim trenjem.

Među čimbenicima koji utječu, normalno opterećenje (kontaktni tlak), brzina klizanja, temperatura i okolna atmosfera igraju ključnu ulogu u utjecaju na tribološke performanse. Brojna istraživanja pokazala su kako sp² bogati (FLC i GLC) ili hidrogenirani DLC mogu izdržati vrlo visok kontaktni tlak (do 1,24 GPa) rekonstrukcijom međuslojnih sp²-slojnih struktura u grafen ili stvaranjem grafitnih ljuski ili lokalnom transformacijom izazvanom pritiskom. Pokazalo se pri tome kako pri velikim brzinama dolazi do narušavanja stabilnosti supermazivosti u širokom rasponu od 3 - 70 cm · s⁻¹, zbog odsutnosti tribojera na kontaktnoj površini, a ne zbog efekta topline koja treperi ili zbog uništavanja pasivizacije vodika. Rezultati eksperimentalnih i teorijskih proračuna potvrdili su odlučujuću ulogu fluora i silicija u stabilizaciji vezne mreže rasutog filma i formiranog trosloja formiranjem F-C i Si-C veza. Za ljepljivi triboelement DLC protiv glinice, pojašnjena je ovisnost o temperaturi vulkana (300-1000 K) sa stajališta tribokemijskih reakcija. Porast trenja u rasponu od 600–800 K pripisan je stvaranju veza C – O i C – Al duž kliznog sučelja, a naknadno smanjenje na 800–1.000 K proizašlo je iz grafizacije DLC-a. Što se tiče okolišnih plinovitih učinaka, novi skup podataka proširio je primjenu DLC-a s malim trenjem na atmosferu ugljičnog dioksida formiranjem površina završenih laktonom (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020, str. 223).

Supermazivost dvodimenzionalnih (2D) materijala još je jedna tehnologija koja se značajno razvija u posljednje vrijeme. Uslijed slabe međuslojne interakcije zabilježeno je da grafit, grafen, ugljične nanocijevi i drugi 2D materijali nude potencijalne mogućnosti za postizanje supermazivosti. Do sada je mazivost postignuta u različitim materijalnim sustavima na različitim duljinama, otkrivajući niz novih fizikalnih mehanizama. Teoretski se predlaže da heterostrukture sastavljene od 2D slojeva s neusklađenošću rešetki i unutarne nesrazmjerne međufazne geometrije pružaju savršen modelni sustav za postizanje robusne supermazičnosti. Iako je teoretski ispravno, izazovno je eksperimentalno provjeriti ovaj mehanizam zbog činjenice da je teško izvoditi ispitivanja trenja klizanjem između 2D slojeva. Nedavno je predložena metoda mehaničkog pilinga i prijenosa (TAMET) za postizanje superlubribilnosti između 2D heterostruktura s koeficijentom trenja do razine, gdje su izrađeni različiti 2D AFM vrhovi omotani pahuljicama kako bi izravno izmjerili međuslojno trenje između 2D čestica u monokristalnom dodiru, kao što je prikazano na slici u nastavku. Također je otkrivena međuslojna sprega između uvijenih MoS₂ slojeva upotrebom niskofrekventne Ramanske

spektroskopije, koja je odraz sloja posmičnog režima i konstanti sile (Zhou, Jina, Qinghai, Dameng, & Luo, 2019, str. 160).

Slika 8: Trenje između vrha omotanog grafitom u ljuskice i h-BN podloge



Izvor: (Zhou, Jina, Qinghai, Dameng, & Luo, 2019)

Sve više istraživanja provodi se i u pogledu razvoja tekućih supermaziva, pri čemu se mehanizam djelovanja može sažeti kao hidracijski učinak, kemijski reakcijski sloj, hidrodinamički učinak i dvostruka električna interakcija slojeva koja će biti važnija u supermazivosti. U praksi se uglavnom primjenjuje kombinacija višestrukih učinaka. Maziva za supermazivost razvijena su od čiste vode, otopina soli, kiselina te kiselinsko-alkoholnog sustava, Također se primjenjuju supermaziva na bazi biotečnosti, sustava na bazi ulja i površinski aktivne tvari (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020).

6. 2. Biotribologija

Riječ "biotribologija" prvi je put upotrijebio i definirao je Dowson 1970. godine kao "one aspekte tribologije koji se bave biološkim sustavima". Međutim, u međuvremenu su provedena mnoga istraživanja prakse trenja, trošenja i podmazivanja bio-sustava pa je na

temelju toga uveden koncept biotribologije. Trenutno je biotribologija jedno od najzujbudljivijih i najbrže rastućih područja tribologije. Opseg istraživačkih aktivnosti ogroman je i obuhvaća mnoga znanstvena područja. Biotribologija je jedno od najproučenijih i najaktivnijih područja istraživanja u području tribologije.

Najvažnija primjena biotribologije jest u medicini. Biomedicinski tribološki sustavi uključuju širok spektar sintetičkih materijala i prirodnih tkiva, uključujući hrskavicu, krvne žile, srce, tetive, ligamente i kožu.

Ovi materijali djeluju u složenom interaktivnom biološkom okruženju. Biotribolozi uključuju koncepte trenja, trošenja i podmazivanja ovih bioloških površina u različite primjene, poput dizajna zglobova i protetskih uređaja, trošenja vijaka i ploča u sanaciji prijeloma kostiju, trošenja proteza i restaurativnih materijala, trošenja zamjenskog srca ventili, pa čak i tribologiju kontaktnih leća (Jin, 2015).

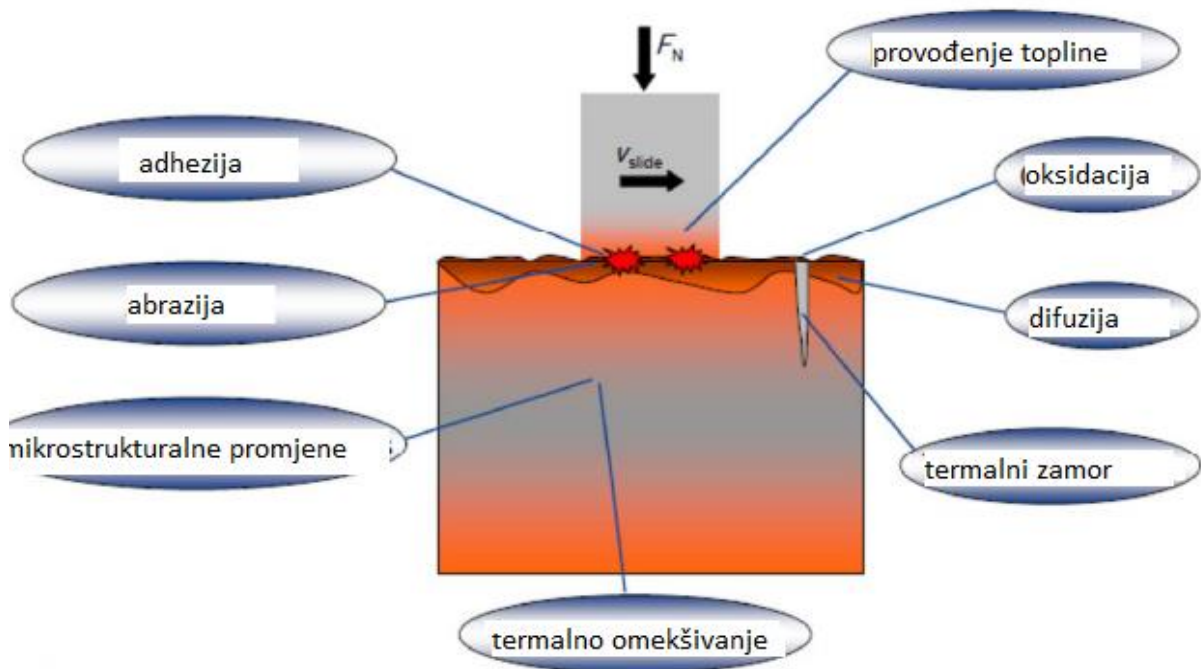
Općeniti biomaterijali, posebno metalni, u posljednje vrijeme su dobili značajnu pozornost. Očna tribologija, uključujući oko, kontaktne leće i maziva, te temeljni mehanizam podmazivanja, također je sve više istraživana. Iako se većina studija iz biotribologije fokusirala na makroskopske materijale, sve veći broj ispitivanja ispitivan je mikroskopski na staničnoj razini. Tribološka ispitivanja na životinjama također su primila značajnu pozornost, obuhvaćajući brojne životinje poput gekona, ptica, kornjaša i glista itd. Važni su bili i temeljni mehanizmi prirodnih organa i biomimetička primjena. Fokus na biljnu tribologiju uglavnom je bio usmjeren na razvoj ekološki prihvatljivijih maziva (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020, str. 226).

6. 3. Tribologija visokih temperatura

Postoji nekoliko primjena tribologije u okruženjima veoma visokih temperatura. Primjerice to su automobilska industrija, zrakoplovna industrija, procesi proizvodnje energije i obrade metala u kojima se interakcija dviju (relativno pokretnih) dodirujućih čvrstih površina događa na visokim temperaturama zbog inherentne prevalencije visokih temperatura. Nadalje, sve veća potražnja za kompaktnim, laganim strojevima i visokim performansama dovela je do drastičnog povećanja gustoće prenesene energije mehaničkih sustava. Rad triboloških sučelja pomičnih dijelova stroja u takvim sustavima stoga se javlja sve više i više pod teškim

kontaktnim uvjetima, uključujući one koji uključuju visoke temperature, uglavnom zbog zagrijavanja trenjem. Rad mehaničkih sustava na povišenoj temperaturi ima ozbiljne posljedice u pogledu učinkovitosti, performansi i pouzdanosti zbog utjecaja temperature na karakteristike trenja i trošenja kontaktnih materijala. Pojam "tribologija visoke temperature" dvosmislen je jer ne postoji opće ograničenje što zapravo znači visoka temperatura i vrlo je ovisan o sustavu. Složenost tribologije na visokim temperaturama prikana je na slici u nastavku:

Slika 9: složenost procesa tribologije na visokim temperaturama



Izvor: samostalna izrada autora prema (Bhushan, 2013)

Zrakoplovstvo, obrada metala i proizvodnja električne energije nekoliko su tehnoloških primjena u kojima tribološki kontakti djeluju na ekstremno visokim temperaturama, ponekad i višim od 900 °C. Istaknuti učinci izazvani radom triboloških sučelja na povišenim temperaturama su povećana brzina tribokemijskih reakcija (uglavnom oksidacija) i pogoršanje mehaničkih svojstava materijala. Visokotemperaturni tribološki fenomeni vrlo su složeni jer se karakteristike površine i površine pri kontaktu s materijalima podvrgavaju promjenama kada su izložene visokim temperaturama. Stoga su se potrebe, mogućnosti i

izazovi na polju istraživanja triboloških postupaka visoke temperature u posljednje vrijeme znatno povećali. Ključni fokus istraživanja provedenih u proteklih nekoliko godina bio je na karakterizaciji i razumijevanju mehanizama trenja i trošenja. Vrlo važan dio istraživačkih napora posvećen je kontroli trenja i trošenja pri visokim temperaturama. Tribološki procesi visoke temperature nisu samo složeni već i vrlo raznoliki (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020, str. 253).

Konvencionalna ulja za podmazivanje i masti nisu učinkovita u kontroli trenja i trošenja iznad 300 °C, jer se brzo razgrađuju i gube svoje podmazujuće performanse. Glavni pristupi u kontroli trenja i trošenja na visokim temperaturama uključuju upotrebu posebnih maziva (uglavnom materijala za promjenu faze), čvrstih maziva (također zvanih samopodmazujući materijali), kompozita i površinskih premaza ili obloga. Glavni istraživački naponi na području visokotemperaturne tribologije jasno su usmjereni na razvoj materijala i tehnologija modifikacije površine za kontrolu trenja i trošenja. Tehnologije površinske modifikacije (ili procesi) uključuju dobro poznato površinsko kaljenje (i toplinskim i termokemijskim postupcima), postupke toplinskog raspršivanja, laserske obloge, PVD i CVD da nabrojimo samo neke (Meng, Xu, Jin, Prakash, & Hu, 2020). Općenito je važno u većini slučajeva kontrolirati (ili umanjiti) trenje i trošenje. Međutim, primarni naglasak u nekim slučajevima mogao bi biti smanjenje trenja, dok bi to u drugim slučajevima moglo biti prevencija ili kontrola trošenja.

7. Zaključak

Tribologija je interdisciplinarno područje koje uključuje strojarstvo; znanost o materijalima i inženjerstvo; kemija i kemijsko inženjerstvo te ima ključnu ulogu u smanjenju trenja i habanja na materijalima i samim time produženju trajanja materijala i smanjenju energije prilikom korištenja materijala. Ova široka paleta vještina neophodna je u suvremenom strojarstvu i projektiranju elemenata strojeva jer se uslijed pojave brojnih fizičkih pojava pojavljuje i značajan gubitak energije i materijala. Općenito govoreći, tribologija ima tri glavne teme: trenje, trošenje i podmazivanje te se upravo kroz proučavanje temeljnih zakona i pravila u navedenim područjima traže rješenja za bolju izvedbu materijala i maziva kojim će se smanjiti gubitak u industriji.

Postoje brojni proizvodni postupci koji se oslanjaju na tribologiju, poput valjanja, okretanja, štancanja, brušenja i poliranja. Nadalje, većina metoda transporta ovisi o tribologiji, ne samo unutar mehaničkih komponenata koje ih pokreću, već i na kontaktu između kotača i površina na kojima klize ili se kotrljaju. Postoje i primjeri tribologije u građevinskoj i istraživačkoj opremi kao što su bageri, naftne platforme, pumpe za muljevit gnojnicu i bušilice za kopanje tunela. Procesi trenja i trošenja, te upotreba maziva za kontrolu trenja i trošenja su sveprisutni u raznim industrijama. U suvremenoj primjeni tribologija postaje sve važnije područje proučavanja čak i u medicini te biokemiji.

Primjenom spoznaja i otkrića u tribologiji smanjuje se trenje i habanje materijala primjenom boljih materijala i većom preciznošću izrade kako bi se uklonilo nepotrebno trenje i smanjila potrošnja materijala. Kao najučinkovitiji materijali pokazala se slitina čelik-bronca koja se ističe svojim svojstvima otpornosti. Posebno važnu ulogu također imaju i maziva. Maziva se prvenstveno koriste za odvajanje dvije klizne površine kako bi se smanjilo trenje i trošenje. Oni također obavljaju i druge funkcije, poput odvođenja topline i onečišćenja od sučelja. Maziva su često tekućine, obično se sastoje od ulja i dodanih kemikalija, zvanih aditivi, koji pomažu uljima da bolje obavljaju određene funkcije. Međutim, postoje neke primjene u kojima maziva mogu biti plinovi ili čak krute tvari. Suvremena tribologija sve više se okreće supermazivima koje omogućuju izvanredna svojstva podmazivanja u gotovo svim uvjetima.

Literatura

1. Astakhov, V. P. (2003). *Tribology of Metal Cutting*. Oxford: Elsevier Ltd.
2. Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*. Philadelphia: John Wiley & Sons.
3. Ivušić, V. (1998). *Tribologija*. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju.
4. Jin, Z. (2015). Biotribology: Recent progresses and future perspectives. *Biosurface and Biotribology*, 3-24.
5. Kovačević, V., & Vrsaljko, D. (2020). *Inženjerstvo površina*. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tribologije.
6. Križan, B. (2008). *Osnove proračuna i oblikovanja konstrukcijskih elemenata*. Zagreb: Školska knjiga.
7. Kruz, V. (1969). *Tehnička fizika za tehničke škole*. Zagreb: Školska knjiga.
8. Leksikografski zavod Miroslava Krleže. (2015). *Maziva*. (Leksikografski zavod Miroslava Krleže) Preuzeto 14. 02 2017 iz <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=39637>
9. Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., & Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 221-300.
10. Mortier, R. M., Fox, M. F., & Orszulik, S. T. (2010). *Chemistry and Technology of Lubricants*. Sevenhampton: Springer.
11. Šilić, Đ., Stojković, V., & Mikulić, D. (2012). *Goriva i maziva*. Velika Gorica: Veleučilište.
12. Totten, G. E. (2003). *Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance and testing*. Glen Burnie: ASTM International,.
13. Zhou, X., Jina, K., Qinghai, X. C., Dameng, T. J., & Luo, L. J. (2019). Interlayer interaction on twisted interface in incommensurate stacking MoS₂: A Raman spectroscopy study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 159-164.

Popis grafova

Graf 1: Habanje površina protokom vremena	14
Graf 2: promjena stanja viskoznosti količinom toka (Mortier, Fox, & Orszulik, 2010).....	20

Popis slika

Slika 1: prekomjerno zagrijavanje kao nuspojava trenja	4
Slika 2: utjecaji i podjela tribologije	5
Slika 3: shematski prikaz tribološkog sustava.....	7
Slika 4: shematski prikaz djelovanja sile trenja	9
Slika 6: shematski prikaz nastanka habanja	12
Slika 5: prikaz različitih vrsta habanja ovisno o uzročnicima.....	13
Slika 7: značaj maziva u sprečavanju mikrododira kod trenja.....	18
Slika 8: Trenje između vrha omotanog grafitom u ljuskice i h-BN podloge	26
Slika 9: složenost procesa tribologije na visokim temperaturama	28