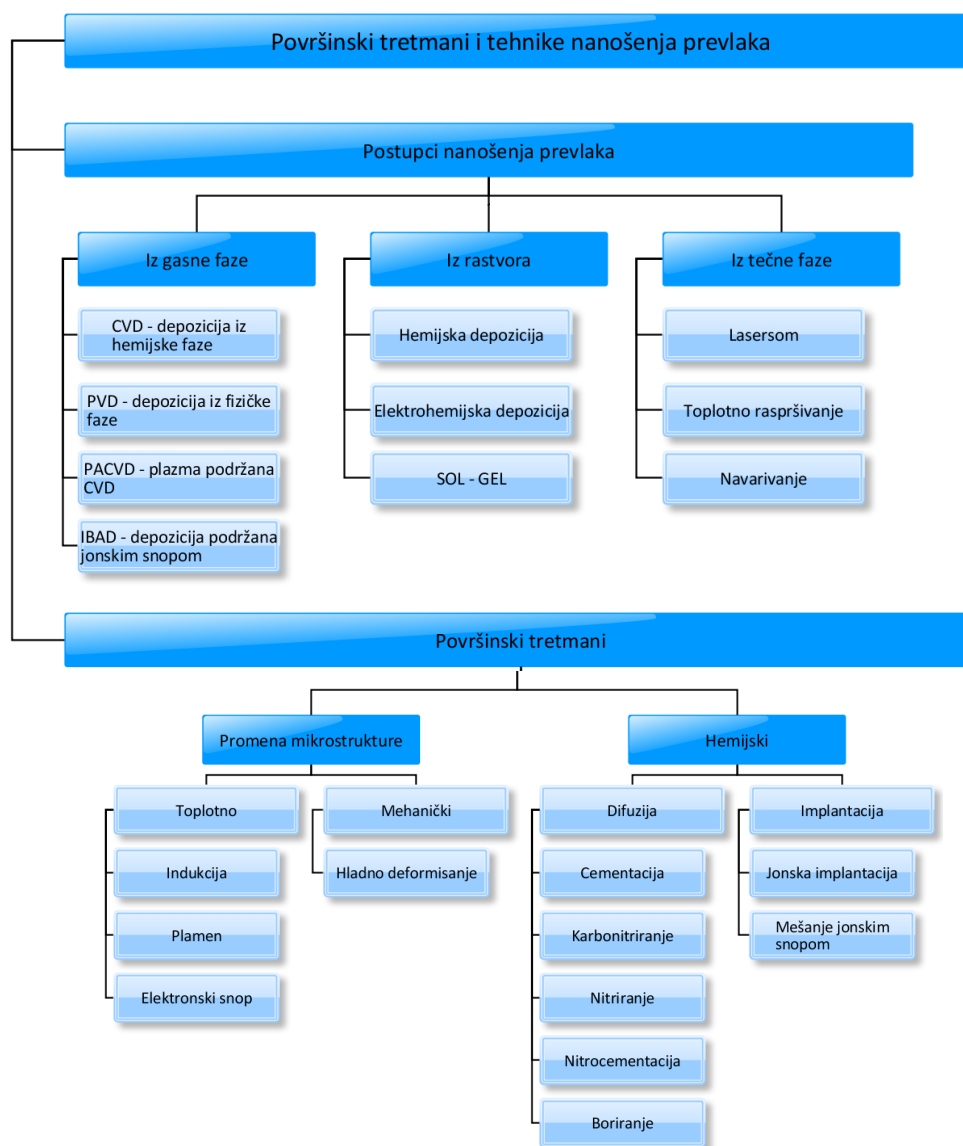


7. VEŽBA – UVOD U TRIBOLOGIJU

Jedan od glavnih problema moderne industrije predstavlja habanje mašinskih elemenata pri kontaktu sa drugim elementima u mašinama i uređajima. Decenijama se ulažu veliki naponi kako bi se efekti trenja i habanja smanjili na najmanju moguću meru.

Da bi prevlaka zadovoljila zahteve u tribološkom smislu ona mora posedovati odgovarajuću kombinaciju osobina: tvrdoću, modul elastičnosti, smicajnu čvrstoću, žilavost loma i adheziju. Problem predstavlja činjenica da je teško postići sve željene osobine istovremeno. Stoga je za poboljšavanje triboloških osobina razvijen i razvija se veliki broj postupaka među koje se ubrajaju i postupci nanošenja tvrdih prevlaka (Slika 7.1).

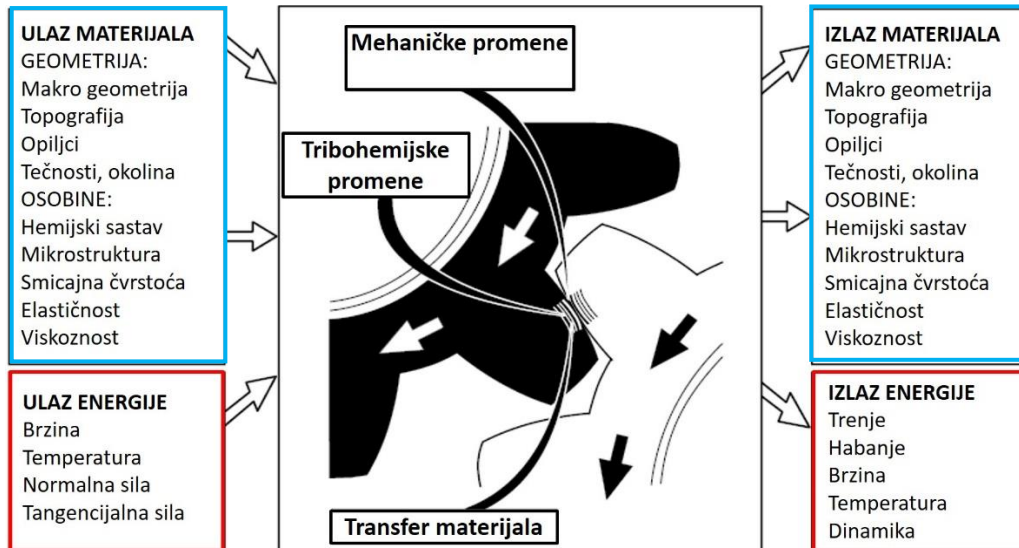


Slika 7.1: Klasifikacija postupaka koji se koriste za poboljšavanje triboloških karakteristika (1)

Izbor odgovarajućeg površinskog tretmana nije lak zadatak, pogotovo kada se kombinuje nekoliko različitih tretmana. Potrebno je dobro poznavati mogućnosti, prednosti i nedostatke svakog površinskog sloja. Izbor postupka površinskog tretmana zavisi od tehničkih zahteva osobina.

Tribološki procesi odvijaju se pri međusobnom kretanju dve površine pri čemu *zavisno od ulaznih parametara* nastaju fizičke i hemijske promene na toj površini. Tokom vremena tribološki procesi dovode do promene u geometriji, sastavu materijala i energetskim izlaznim parametrima: trenje, habanje, brzina, temperatura i dinamičko ponašanje.

U ulazne podatke ubrajaju se geometrija kontakta, osobine materijala (hemijski sastav, struktura) elemenata u kontaktu, parametri okoline, radne karakteristike – *ulaz energije* (normalno opterećenje, brzina, tangencijalna sila, temperatura), slika 7.2 .



Slika 7.2: Promene u tribološkom procesu (2)

U tribologiji se srećemo sa fenomenima trenja i habanja. Trenje predstavlja tangencijalni otpor relativnom kretanju dva tela koja su u međusobnom kontaktu. Habanje je definisano kao progresivan gubitak ili dobitak supstance na površini habanja koja se dešava kao posledica relativnog kretanja površina. Trenje i habanje su rezultat triboloških procesa koji se odvijaju u kontaktu dva tela.

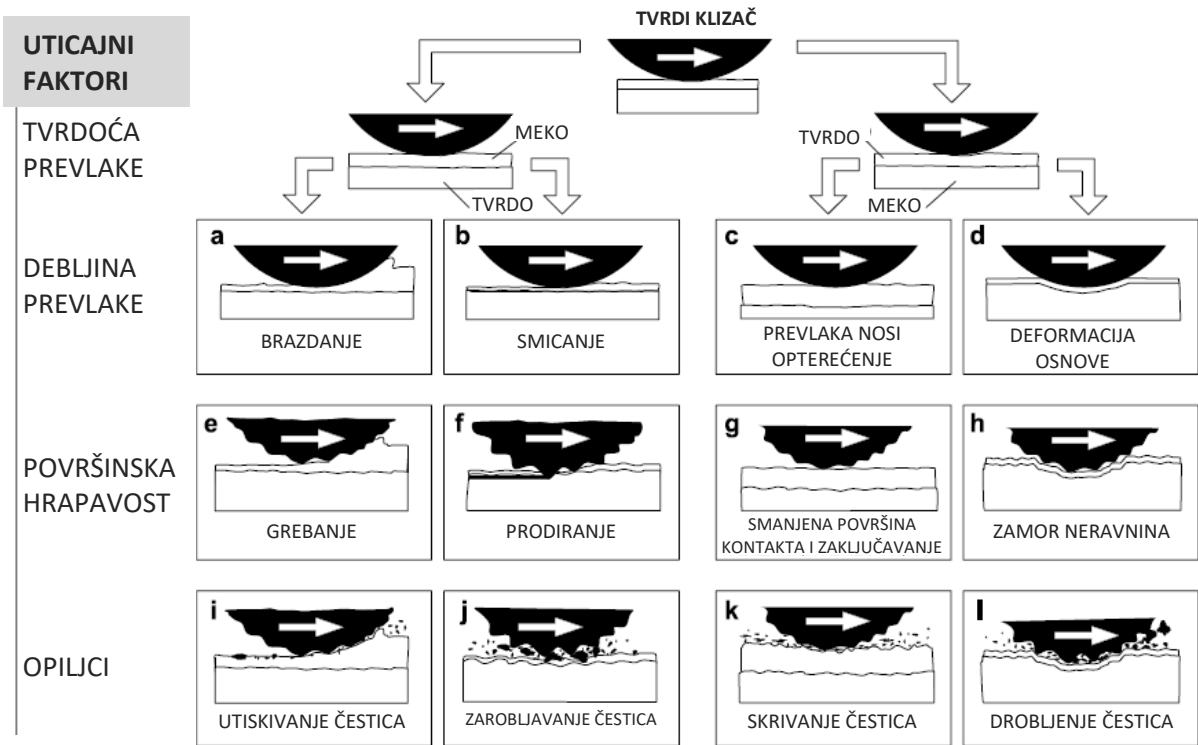
MAKROMEHANIČKI MEHANIZMI TRENJA I HABANJA

Tribološki procesi su veoma složeni i obuhvataju različite vidove trenja, habanja i deformacije na različitim nivoima (makro, mikro). Kako bi se optimizovale osobine površina u kontaktu, potrebno je sistematsko razumevanje mehanizama koji se javljaju u tribo-kontaktu. Poznavanje tribološkog procesa od suštinskog je značaja pri izboru materijala, vrste površinskog tretmana i vrste prevlake.

Makromehanički tribološki mehanizmi opisuju fenomene trenja i habanja uzimanjem u obzir: raspodele napona i deformacije u celoj zoni kontakta, rezultujuće elastične i plastične deformacije i dinamiku formiranja čestica. Kada se dve površine nalaze u kontaktu, a pri tome je jedna ili su obe površine sa prevlakama, tribološko ponašanje određeno je sa četiri parametra (1; 2):

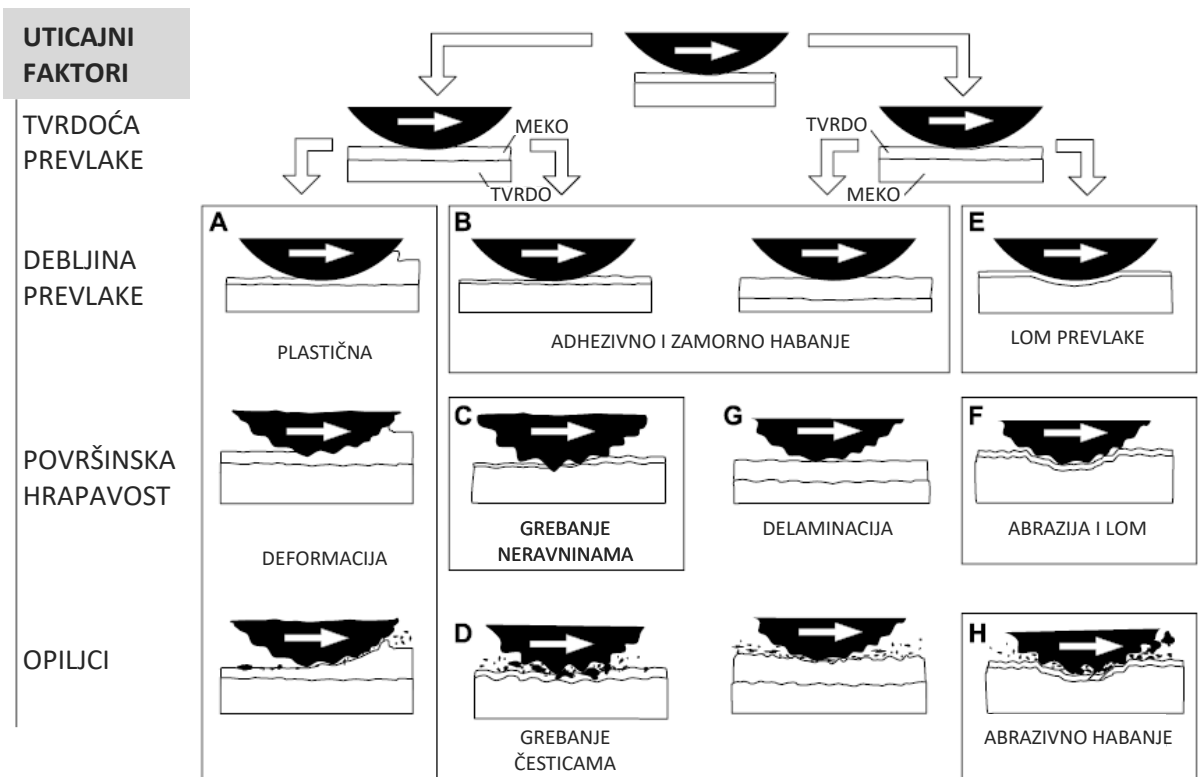
1. tvrdoća prevlake,
2. debljina prevlake,
3. hrapavost površine i
4. veličina i tvrdoća krhotina (otpadaka) u kontaktu.

U zavisnosti od odnosa ovih parametara mogu se definisati različiti mehanizmi trenja i različiti mehanizmi habanja. Na slici 7.3 šematski su predstavljeni tipični tribološki kontakti sa različitim mehanizmima koji utiču na trenje.



Slika 7.3: Makromehanički mehanizmi trenja (2)

Na slici 7.3 je dat uticaj navedenih parametara na mehanizam trenja, a na slici 7.4 su predstavljeni odgovarajući mehanizmi habanja.



Slika 7.4: Makromehanički mehanizmi habanja (2)

Mehanizmi trenja i habanja veoma zavise od toga da li je u pitanju tvrda prevlaka na mekoj podlozi ili meka prevlaka na tvrdoj podlozi.

Ponašanje mekih prevlaka na tvrdim podlogama

Smanjenje trenja usled smicanja u mekom površinskom sloju

Kod mekih prevlaka debljina prevlake utiče na komponentu brazdanja (ploughing) kod trenja. Kada je prevlaka dovoljno tanka efekat brazdanja je mali (slika 7.3 b). Tada je koeficijent trenja određen smicajnom čvrstoćom prevlake i kontaktne zone.

Stvaranje nabora (brda) na prevučenoj površini usled plastične deformacije predstavlja glavni efekat habanja kod debljih mekih prevlaka (slika 7.4 a). Međutim, sa smanjenjem debljine prevlake javljaju se adheziono i zamorno habanje (slika 7.4 b).

Meke prevlake značajno smanjuju koeficijent trenja i efekte habanja.

Trenje usled brazdanja (Ploughing Friction)

Trenje se najčešće povećava sa debljinom prevlake usled elastične i plastične deformacije prevlake i povećanja površine kontakta dva tela (slika 7.3 a).

Uticaj površinske hrapavosti

Hrapavost površine klizača ima gotovo zanemarljiv uticaj na trenje ukoliko je ta hrapavost znatno manja od debljine prevlake a prevlaka kruta dovoljno da nosi opterećenje (slika 7.3 e). Međutim, ukoliko je hrapavost klizača veća od debljine prevlake doći će do prodiranja utiskivača u prevlaku i povećanja trenja usled zaparavanja materijala podloge (slika 7.3 f).

Ovakvi kontakti uslovi javljaju se na slici 7.4 c, gde neravnine utiskivača prodiru u podlogu i zaparavanjem stvaraju pohabane žlebove.

Ponašanje tvrdih prevlakama na mekim podlogama

Smanjenje habanja

Uloga tvrde prevlake na mekoj podlozi je da odvoji podlogu od kontra tela i da povećanjem tvrdoće površinskog sloja spreči brazdanje površine. Sa povećanjem tvrdoće prevlake povećava se otpornost na habanje. Povećanjem tvrdoće podloge smanjuje se površina kontakta, a time i koeficijent trenja.

Tvrde prevlake bez mikrofilma mogu imati veliko trenje

Sprečavanjem brazdanja smanjuje se i trenje i habanje. Međutim, tvrda prevlaka povećava smicajnu čvrstoća na kontaktu što može dovesti do povećanja trenja klizanja ukoliko ne postoji neki mikrofilm u zoni kontakta. Ovo je razlog zašto se često javljaju visoki koeficijenti trenja pri klizanju tvrdih prevlaka (TiAlN, TiN). Efekat povećanja trenja sa povećanjem smicajne čvrstoće dominira u odnosu na smanjenje trenja usled smanjenog brazdanja. Međutim, ova tvrdnja nije tačna kod dijamantskih i DLC prevlaka, koje su tvrde, ali se kod njih u zoni kontakta obrazuje grafitni mikrofilm koji smanjuje trenje usled smanjenja smicajne čvrstoće u zoni kontakta.

Uticaj deformacije podloge na napon i pukotine u prevlaci

Ukoliko je podloga mekana može doći do njene deformacije pri dejstvu opterećenja (slika 7.3 d). Ta deformacija povećava napone u prevlaci i na interfejsu (površina kontakta prevlake i podloge) koji mogu dovesti do loma prevlake. Što je veća tvrdoća podloge to je veće opterećenje koje prevlaka može podneti bez loma.

Debele tvrde prevlake bolje nose opterećenje

Deblja tvrda prevlaka može podneti veća opterećenja zahvaljujući svojoj sposobnosti da nosi opterećenje, time se smanjuje deformacija prevučenog elementa (slika 7.3 c). Povećanjem debljine prevlake menja se vid i veličina napona ispod prevlake.

Otpornost prevlaka na zamor

Tvrde prevlake manje debljine imaju veću otpornost na zamor. Pri jednakim uslovima deformacije javiće se veća savojna naprezanja u debljoj prevlaci. Pošto prevlake najčešće imaju stubastu strukturu, bilo koja pukotina normalna na površinu kod debelih prevlaka imaće veliku dužinu koja može prevazići kritičnu dužinu, što nije slučaj kod tankih prevlaka. Na primer: pri kotrljajućem kontaktu, tvrda TiN prevlaka debljine ispod 1 μm ima do dva puta duži životni vek nego ista prevlaka debljine 2 do 3 μm .

Napon na međupovršini prevlake i podloge

U toku rada prevučenih elemenata javlja se koncentracija napona na međupovršini tvrde prevlake i meke podloge. Oštećenja do kojih dovode ovi naponi zavise od adhezije između prevlake i podloge. Ukoliko se pokidaju adhezione veze dolazi do odvajanja delova prevlake u vidu opiljaka.

Utica j opiljaka na tribološke fenomene

Opiljci (krhotine) često nastaju u zoni kontakta. Mogu da potiču iz okolne sredine ili da nastaju usled različitih mehanizama habanja. Mogu značajno uticati na trenje i habanje u nekim uslovima kontakta, zavisno od veličine čestica, debljine prevlake, hrapavosti površina u kontaktu, tvrdoće prevlake i podloge.

Utiskivanje čestica (Particle Embedding)

U situaciji kao na slici 7.3 i, tvrde čestice koje se nalaze u zoni kontakta biće utisnute u mekanu prevlaku i izgubiće kontakt sa kontra telom ukoliko je prečnik tih čestica manji od debljine prevlake. U ovom slučaju čestice nemaju veliki uticaj na trenje, koje pre svega zavisi od mehanizma brazdanja.

Klizač (kontra telo) stvara glavni žleb u mekoj prevlaci, mehanizmom brazdanja, a površinske neravnine ili zarobljeni opiljci mogu izazvati mikrobrazdanje i mikrožlebove unutar glavnog žleba.

Zarobljavanje čestica (Particle Entrapping)

Uticaj čestica koje su veće od debljine prevlaka na trenje može biti značajan (slika 7.3 j). Ako su čestice tvrđe od prevlake, ali mekše od podloge one se lako smeštaju između površinskih neravnina kontra tela i zaparavaju meku prevlaku, kao u slučaju prodiranja neravnina. Trenje se povećava jer čestice zaparavaju prevlaku. Veličina habanja zavisi od veličine čestica.

Ako su čestice meke, njihov uticaj na tribološke fenomene je potpuno drugačiji. Meke čestice male smicajne čvrstoće zarobljene u zoni kontakta mogu preneti deo opterećenja i sprečiti direktni kontakt dva tela, čime se smanjuje i trenje i habanje. U ovom slučaju čestice se ponašaju kao čvrsto sredstvo podmazivanja (lubrikant).

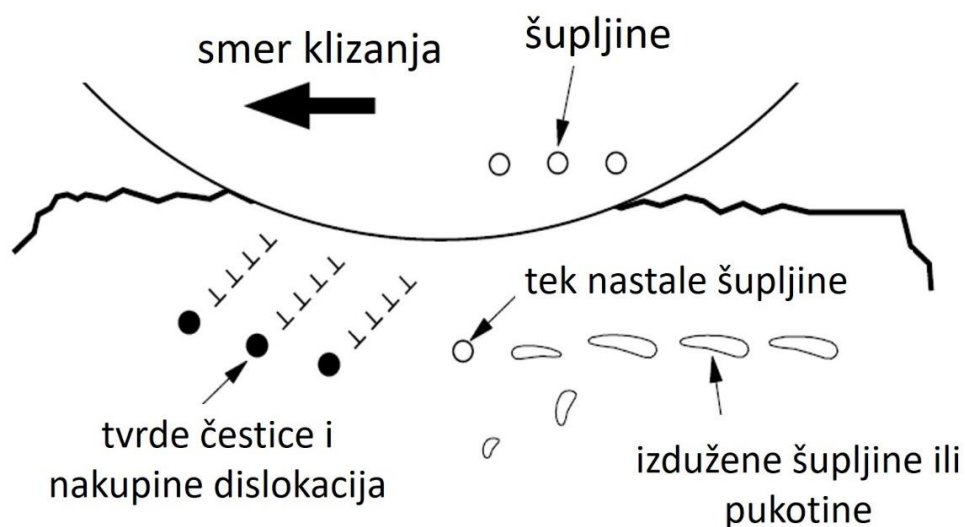
Skrivanje čestica (Particle Hiding)

Prisustvo malih čestica u zoni kontakta tvrdih i hrapavih površina ne mora po pravilu pooštriti uslove tribološkom kontaktu (slika 7.3 k). Čestice mogu biti skrivene između neravnina, pa se klizanje odvija po vrhovima tih neravnina. Stoga ovakve čestice neće imati veliki uticaj na trenje i habanje.

Važno je napomenuti da se smanjenjem površinske hrapavosti mogu povećati i trenje i habanje, jer čestice nemaju gde da se smeste. U ovom slučaju čestice mogu da zaparavaju površinu ili mogu da pospešuju spajanje dve površine.

Odlamanje (Delamination)

Često se pri klizanju tvrdog klizača preko tvrde, hrapave površine, klizanje odvija po vrhovima neravnina u kontaktu (slika 7.4 g). Pošto se pritisak ne raspoređuje po celoj površini nego samo po neravninama javljaju se veliki lokalni naponi. Visoki kontaktni naponi mogu dovesti do pojave dislokacija, nagomilavanja dislokacija i stvaranja pukotina u blizini površine (slika 7.5). Spajanjem većeg broja nastalih pukotina (ovo se dešava kod promenljivog opterećenja) nastaju pahuljasti opiljci koji mogu biti dužine više stotina mikrometara.



Slika 7.5: Početni stadijum delaminacije izduživanjem i spajanjem šupljina u površinskom sloju

Lomljenje čestica (Particle Crushing)

Ukoliko su čestice između dve tvrde površine velike u odnosu na hrapavost površine može doći do lomljenja čestica, zaparavanja, ili kotrljanja (slika 7.3 i). Ako čestice imaju manju tvrdoću od površina u kontaktu, one će biti slomljene usled kontaktnog opterećenja. Nastaće manji opiljci i doći će do povećanja trenja.

Ukoliko su čestice veće tvrdoće od površina u kontaktu one će se smestiti između neravnina i vršiće brazdanje ili zaparavanje. Ove čestice nose deo opterećenja što pri pokušaju prodiranja čestica dovodi do koncentracije napona na obe kontaktne površine.

Ponekad tvrde čestice mogu smanjiti koeficijent trenja. Ako su nastale čestice okruglog oblika, tvrde dovoljno da nose opterećenje i barem jedna površina je glatka, čestice se mogu ponašati kao kuglice u kotrljajnim ležajevima i smajiti trenje.

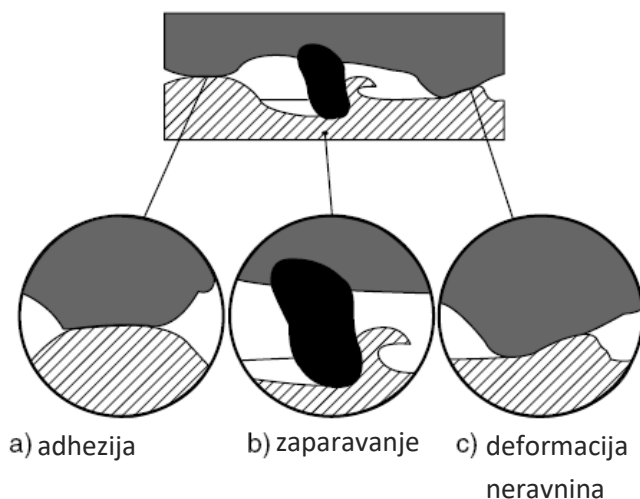
MIKROMEHANIČKI MEHANIZMI TRENJA I HABANJA

Poreklo fenomena trenja i habanja na makro nivou određuju mehanizmi koji deluju na mikro nivou. Mikromehanički tribološki mehanizmi opisuju fenomene trenja i habanja uzimanjem u obzir: napona i deformacija na nivou neravnina, stvaranja i širenja pukotina i odvajanja materijala koji se javljaju na nivou neravnina površine. U tipičnom inženjerskom kontaktu, ovi fenomeni su reda veličine 1 μm ili manje.

Pri tribološkom kontaktu, dve površine mogu da se kreću jedna u odnosu na drugu klizanjem, kotrljanjem i udarnim kretanjem. Interakcija između površina u kontaktu i nastale promene u materijalu određuju način trenja i habanja. **Trenje nastaje usled adhezije, brazdanja i deformacije neravnina** (slika 7.6). Ukoliko je reč o kotrljanju, trenje nastaje usled elastičnog histerezisa materijala u kontaktu.

Mehanizmi trenja pri klizanju

Tri osnovna mikromehanizma deluju istovremeno:



a) adhezija b) zaparavanje c) deformacija neravnina

adhezija – kada dve neravnine dodju u kontakt one se mogu zavariti jedna za drugu usled adhezije između dva materijala. Kada se jedan od dva materijala pomeri tangencijalno u odnosu na drugi doći će do kidanja mikrozavarenih delova. Čvrstoća nastalog spoja izaziva otpor kretanju (slika 7.6 a). Trenje usled adhezije ima vrednosti $\mu = 0 \div 0.4$. Visoke vrednosti su za površine od istog materijala koje nemaju kontaminirajućeg ili oksidnog sloja između. Najniže vrednosti su za dobro podmazane površine.

Slika 7.6: Komponente trenja klizanja: a) adhezija, b) brazdanje i c) deformacija neravnina

deformacija neravnina – otpor kretanju nastaje usled rada pri plastičnom deformisanju neravnina koje kližu jedna po drugoj (slika 7.6 c). Trenje usled deformisanja neravnina dostiže vrednosti $\mu = 0 \div 0.43$ (max. 0.75). Ova komponenta najviše utiče na veličinu statičkog koeficijenta trenja. Nakon što neravnine budu deformisane, uticaj međusobnog zahvatanja i deformisanja neravnina znatno opada. Ova komponenta doprinosi koeficijentu stacionarnog trenja u slučaju da dolazi do kontinuiranog nastajanja novih

zaparavanje – kada se tvrda neravnina ili tvrda čestica utisne u mekši materijal stvara se brazda u mekšem materijalu koja stvara otpor kretanju (slika 7.6 b). Trenje usled zaparavanja daje vrednosti $\mu = 0 \div 0.4$ (max. 1.0). Niže vrednosti se odnose na odsustvo čestica iz kontakta ili za klizanje mekane površine po tvrdoj površini sa veoma malom hrapavosti. Tada je malo verovatno trajno utiskivanje abrazivnih čestica u tvrde kontratelo. Najveće vrednosti su za istorodne materijale, kada se abrazivne čestice utiskuju u oba kontratela, sprečavajući kotrljanje čestica.

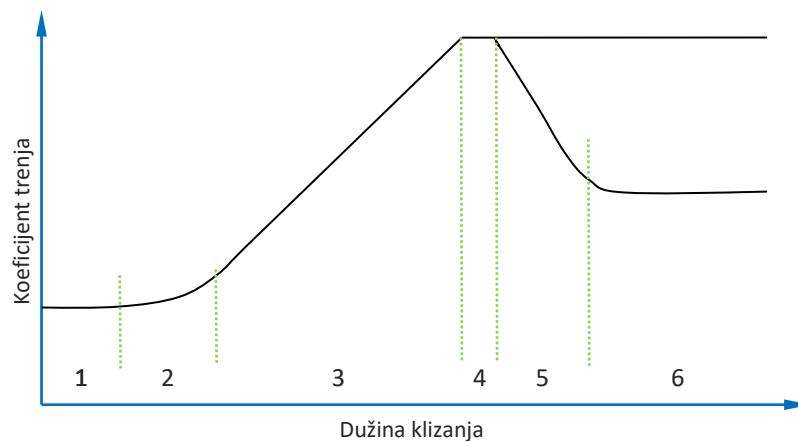
Faze početka relativnog klizanja dva kontratela

Definišu se šest faza relativnog klizanja dva tela u kontaktu (slika 7.7) (3):

1. interakcija neravnina - oksidni i/ili kontaminirani sloj još nisu pohabani, tako da adhezija nema znatnog uticaja. Takođe nema ni produkata habanja;
2. kontaminirani i oksidni sloj bivaju pohabani;
3. koeficijent trenja raste usled naglog povećanja broja produkata habanja u kontaktu, od kojih mnogi prodiru u materijal izazivajući zaparavanje. Deformisanje neravnina se nastavlja, a zbog odsustva međuslojeva adhezija ima sve veći uticaj.
4. količina habajućih čestica koje ulaze i izlaze iz kontakta su u ravnoteži. Udeo adhezije je takođe konstantan. Deformacija neravnina je takođe konstantna, pošto usled delaminacije dolazi do stvaranja nove hrapave površine.

Kod klizanja dva istorodna materijala, izostaju efekti koji utiču na pojavu sledeće faze, tako da ova faza predstavlja stacionarno stanje (konstantno trenje).

5. javlja se u slučaju kombinacije veoma tvrdog i mekanog kontratela. Neravnine na tvrdom kontratelju bivaju uklonjene, što stvara zaglađenu površinu. Zbog toga se smanjuje udeo deformisanja neravnina, a abrazivne čestice se u manjoj meri vezuju za tvrđu površinu.
6. koeficijent trenja dostiže stacionarnu vrednost, kada su površine i tvrdog i mekšeg kontratela zaglađene.



Slika 7.7: Faze početka relativnog klizanja dva kontratela

VRSTE HABANJA

U zavisnosti od parametara materijala i procesa (tvrdoća prevlake, debljina prevlake, hrapavost površine i veličina i tvrdoća krhotina (otpadaka) u kontaktu) deluju različiti mehanizmi trenja i habanja. Detaljnijom analizom makromehaničkih mehanizama habanja može se uvideti da u tim sistemima postoji više pojedinačnih (nezavisnih) mehanizama koji deluju simultano. Stoga će se najtipičniji tribološki mehanizmi habanja obraditi u nastavku

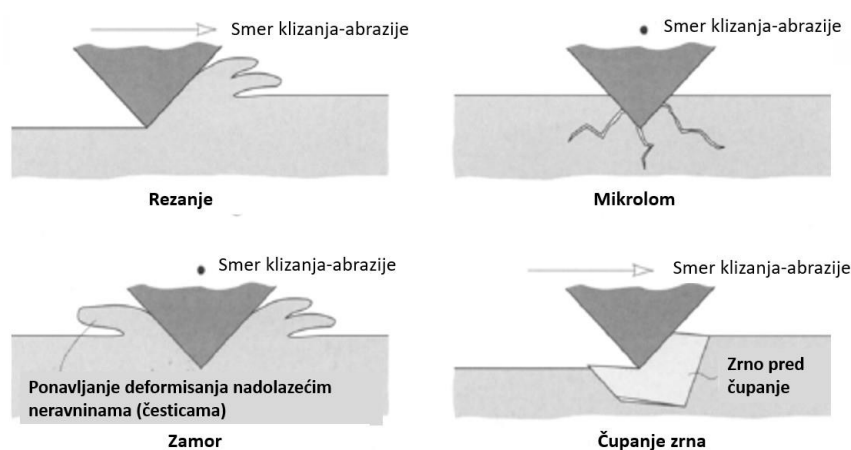
Abrazivno, erozivno i kavitaciono habanje

Abrazivno habanje

Abrazivno habanje se javlja kod kontakta gde je jedna površina znatno tvrđa u odnosu na drugu ili u slučajevima gde osim dva tela u kontaktu dolazi do nastanka ili unošenja tvrdih čestica.

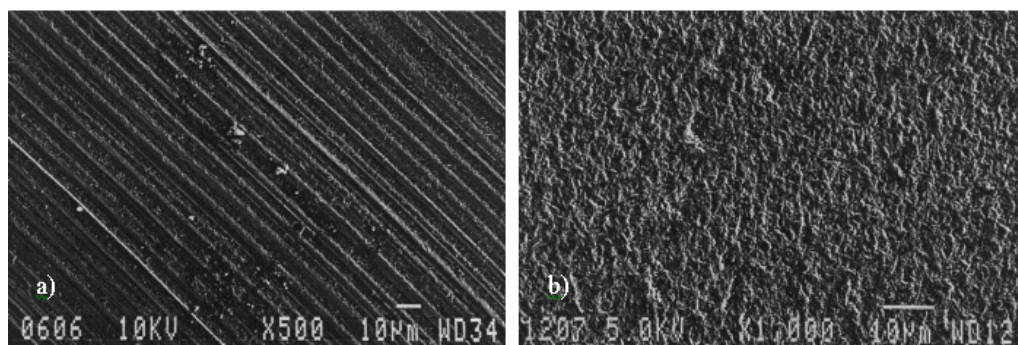
Uklanjanje materijala može imati više oblika: mirkorezanje, mikrolom, čupanje pojedinih zrna i zamor usled ponavljanja deformacije (slika 7.8).

Rezanje nastaje kada tvrda neravnina ili oštra čestica seku mekšu površinu. *Mikrolom*: ukoliko je materijal krhki može doći do pojave pukotina u površini. *Zamor*: ukoliko je čestica tupa mala je verovatnoća da će doći do rezanja, te je ona izložena ponovljivim deformacijama. *Čupanje zrna*: javlja se uglavnom kod keramike ukoliko je slaba granica zrna.

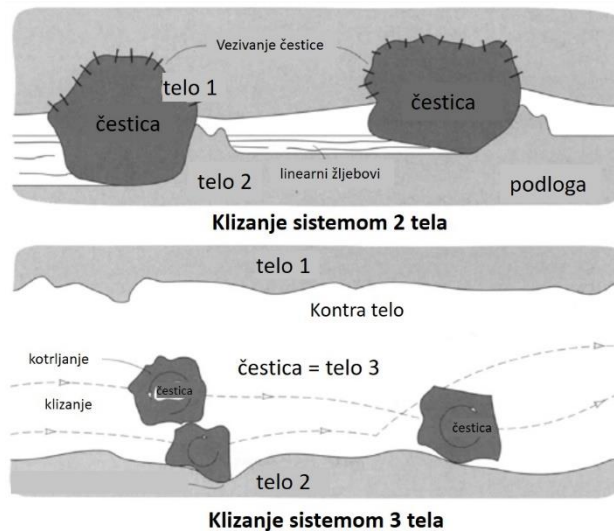


Slika 7.8: Mehanizmi abrazivnog habanja (4)

Razlikuju se dva načina abrazivnog habanja: habanje po sistemu dva tela (slika 7.9) i habanje po sistemu tri tela (slika 7.10b). Primer pohabanih površina su dati na slici 7.9.



Slika 7.9: Tragovi abrazivnog habanja po sistemu: a) dva tela, koje se javlja kada je jedno kontratelo znatno tvrđe ili kad se uvedena abrazivna čestica zarije u jedno od kontratela (obično tvrđe); b) tri tela, koje se javlja pri kotrljanju abrazivne čestice između dva kontratela.



Slika 7.10: Načini abrazivnog habanja: a) po sitemu dva tela, b) po sistemu tri tela (4)

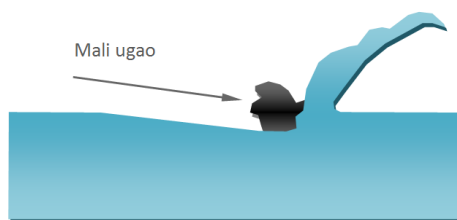
Deformisanje neravnina se javlja zbog hrapavosti površina. Usled kolizije neravnina dolazi do plastične deformacije jedne ili obe neravnine koje su u kontaktu. Danas se smatra da je veliki deo efekata habanja, koji su bili pripisivani adheziji, zapravo posledica deformisanja neravnina (3).

Erozivno habanje

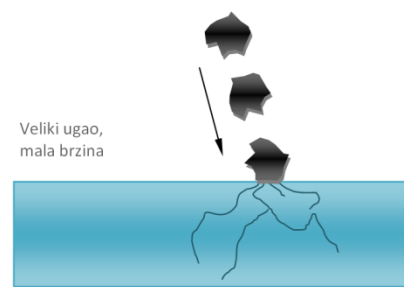
Erozivno habanje nastaje usled udara čestica čvrstog materijala ili čestica tečnosti u površinu nekog objekta. Ovaj vid habanja javlja se često u praksi, a tipičan primer su oštećenja na gasnim turbinama koja se javljaju kada avion leti kroz oblak prašine.

Mehanizmi erozivnog habanja zavise od materijala čestica, upadnog ugla, upadne brzine i veličine čestica. Ukoliko je u pitanju čvrsta, tvrda čestica mogu se javiti slični procesi kao kod abrazivnog habanja. Ukoliko su u pitanju tečne čestice neće doći do abrazije, a do habanja dolazi usled dejstva ponovljivog napona. Mehanizmi erozivnog habanja ilustrovani su na slici 7.11.

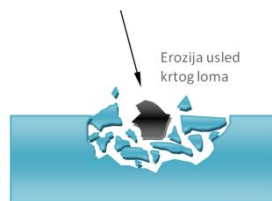
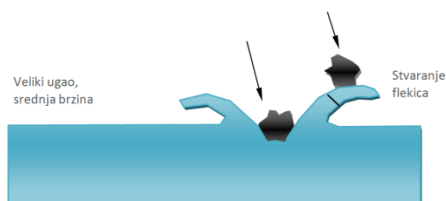
Abrazija pri malim upadnim uglovima



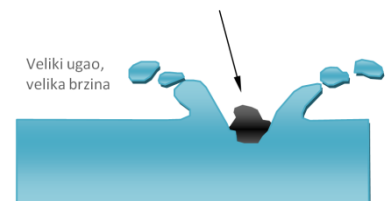
Površinski zamor pri malim brzinama i velikim upadnim uglovima



Krti lom ili višestruka plastična deformacija pri srednjim brzinama i velikim upadnim uglovima



Topljenje površine pri visokim brzinama



Slika 7.11: Mogući mehanizmi erozije

Kavitaciono habanje

Ovakav način habanja sreće se javlja kod propelera i delova ventila. Do ovog habanja dolazi usled kretanja tečnosti velikim brzinama pri čemu nastaju mehurići gasa u tečnosti koji kada eksplodiraju uz površine materijala obrazuju mikrooštećenja koja vremenom propagiraju u kratere na površini.

Adhezivno habanje

Kada neravnine jedne površine dođu u kontakt sa neravninama kontratela, može doći do snažnog adhezivnog vezivanja (spajanje neravnina: asperity conjunctions).

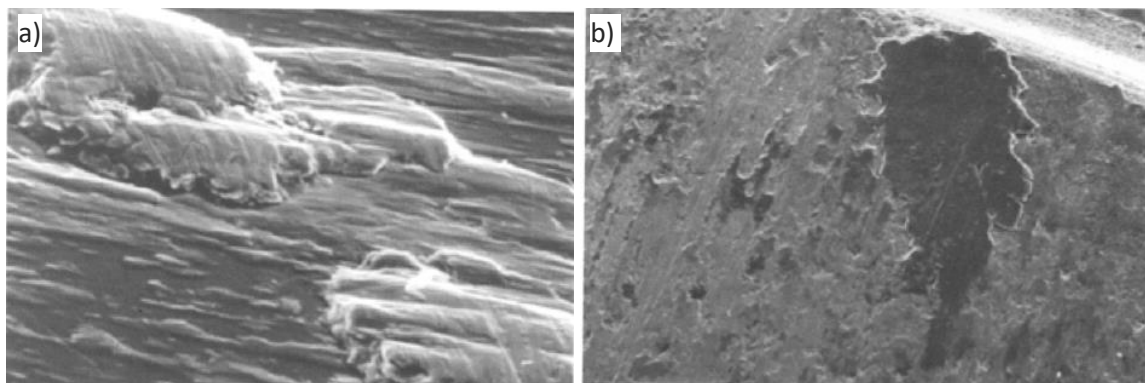
Usled relativnog kretanja površina, ako je čvrstoća jednog materijala (mekšeg) manja od adhezivne veze, neravnine se odlamaju, i na taj način dolazi do odstranjivanja materijala (slika 7.12). Primer transfera materijala dat je na slici 7.13.



Slika 7.12: Proces transfera materijala usled adhezije

Adhezivno habanje je veoma ozbiljan vid habanja koji se karakteriše velikim stepenom habanja i visokim, nestabilnim koeficijentom trenja. Adhezija se povećava sa povećanjem tvrdoće i hrapavosti površina u kontaktu.

Adhezivno habanje se smanjuje ili izbegava primenom lubrikanata ili postojanjem kontaminirajućih filmova. Često veličina adhezije nije veća od čvrstoće materijala pa ne dovodi do oštećenja. Ovde su u pitanju slučajevi kod kojih velika koncentracija nečistoća i grešaka u zoni kontakta smanjuje adheziju.



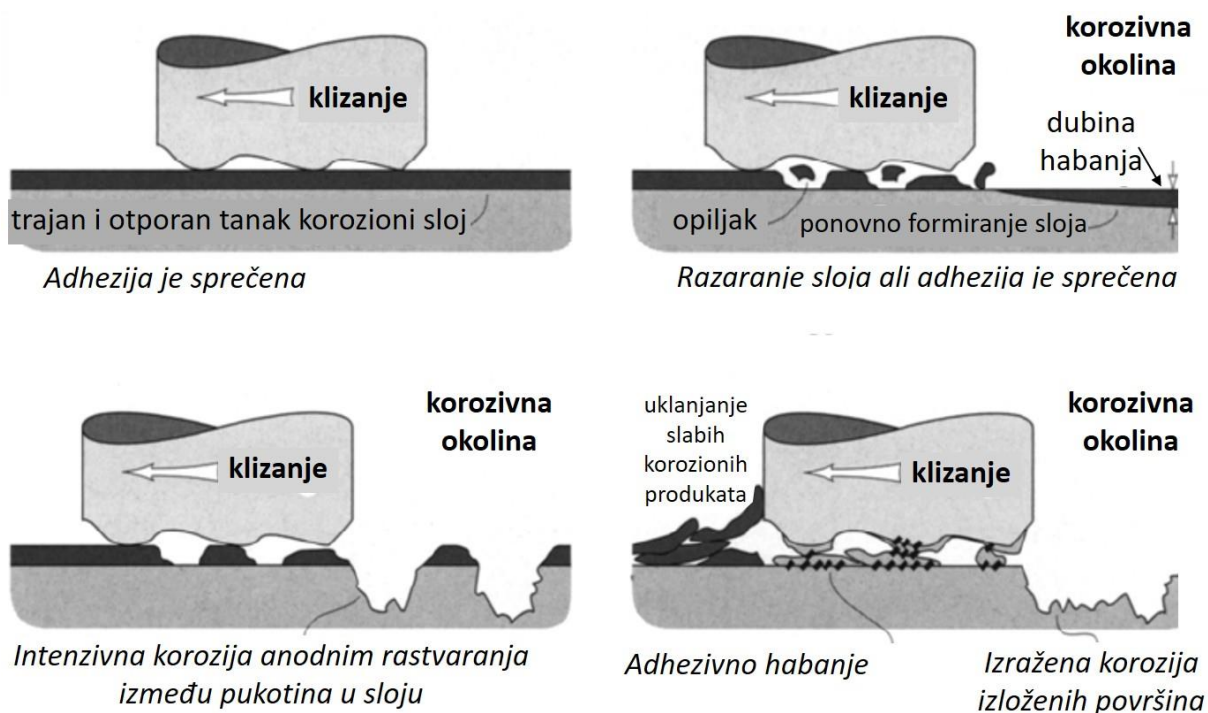
Slika 7.13: Primer transfera metala: a) transfer mesinga na aluminijum, b) transfer aluminijum-silicijum legure na kariku automobilskog motora

Hemijsko habanje

Hemijsko habanje česta je pojava bilo da se radi o podmazanim ili nepodmazanim površinama. Glavni uzrok ovog oblika habanja su hemijske reakcije između materijala u kontaktu i medijuma, koji može biti neki hemijski reaktant, reaktivno mazivno sredstvo ili vazduh.

Ukoliko je materijal korodirao i pri tome je stvoren tanak površinski sloj i ako se takav materijal izloži kontaktu klizanja, mogu se javiti četiri procesa (slika 7.14):

1. stvara se trajan podmazujući sloj koji sprečava i koroziju i habanje;
2. stvara se slab film koji ima kratak vek pri kontaktu klizanjem;
3. dolazi do uklanjanja zaštitnog sloja (npr. usled pitinga) i pojave galvanizacije između preostalog sloja i materijala elementa na kome se sloj nalazi, što može rezultovati brzom korozijom pohabane zone na površini materijala;
4. procesi korozije i habanja javljaju se odvojeno i izazivaju gubitak materijala kao zbir delovanja ova dva procesa.



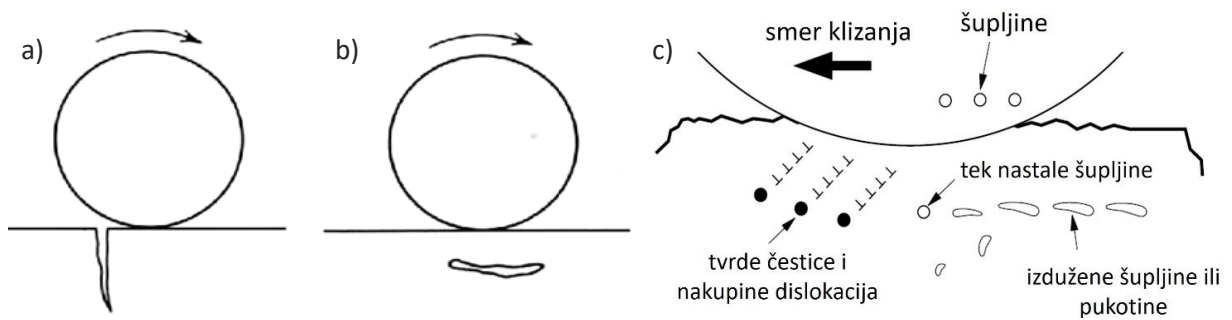
Slika 7.14: Modeli interakcije između korozivne sredine i pohabane površine

U prvom procesu formira se izdržljiv podmazujući sloj koji sprečava dalje habanje. Nažalost samo je manji broj filmova nastalih usled korozije zaista izdržljiv i retko se sreću u praksi. U drugom procesu u toku klizanja nastaje film čiji je radni vek kratak. Ovo je najčešći oblik korozivnog habanja jer pri koroziji najčešće nastaju kruti filmovi koji se sastoje od oksida i drugih krutih jedinjenja. Treći proces karakterističan je za slučajeve habanja u izrazito korozivnoj sredini. Četvrti proces javiće se u ekstremno korozivnom medijumu, nastaju slabi produkti korozije koji su najčešće razgradivi u tečnom medijumu.

Zamorno habanje

Ovaj mehanizam habanja nastaje usled fenomena koji se javljaju pri opterećenju i rasterećenju površinskog sloja. Materijali mogu podneti određeni nivo napona kada su jednom opterećeni ili sa

malom učestalošću opterećenja i rasterećenja, ali ne i pri učestaloj promeni opterećenja, slika 7.15.

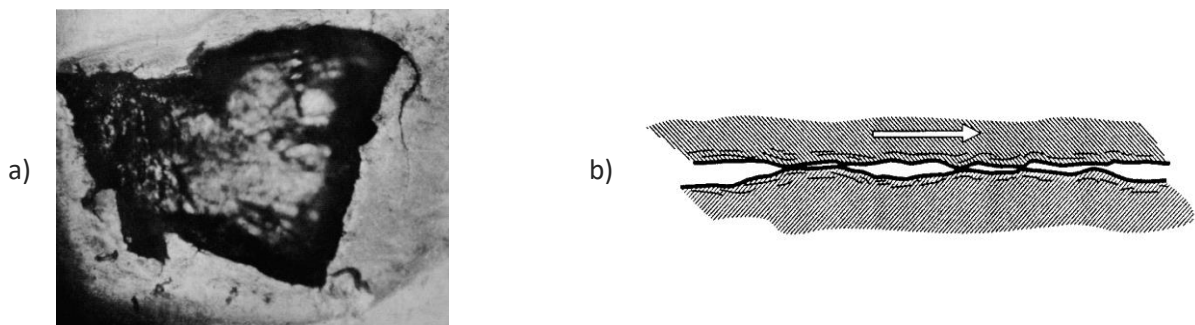


Slika 7.15: Zamorne prsline u površinskom sloju nastale kao posledica: a) zateznih napona na zadnjoj strani kontakta, b) tangencijalnih napona, c) početni stadijum delaminacije izduživanjem šupljina u površinskom sloju i njihovim spajanjem

Kao posledica zamornog habanja pri kotrljanju javljaju se veliki odljuspani delići, dijametra 1 do 2 mm (tzv. piting), nakon čega dolazi do brzog razaranja površine (slika 7.16).

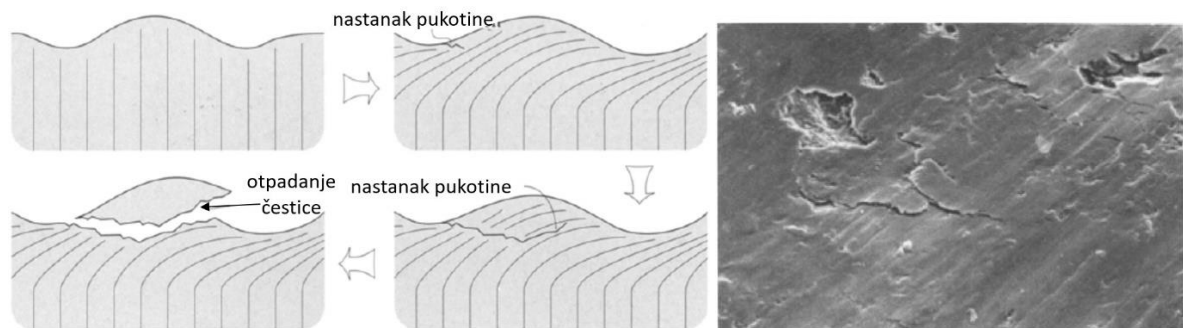
Kod klizanja, na samoj površini vlada troosni pritisak, tako da prsline izlaze napolje tek pošto su se prethodno proširile paralelno površini toliko da su stvorile veće delaminirane površine (slika 7.16).

Obično se habanje usled kotrljanja naziva zamorno, a usled klizanja delaminirajuće. Zapravo, oba habanja su zamorna.



Slika 7.16: a) Zamorni lom čelične kugle (piting); b) delaminirajuće habanje: vrsta zamornog habanja kod klizanja gde pukotine koje se šire paralelno površini stvaraju veće delaminirane površine

Slika 7.17 prikazuje šematski proces nastanka zamorne prsline i primera površine pohabane usled zamornog habanja.



Slika 7.17: Šematski prikaz mehanizma zamornog habanja i primer oštećenja površine usled zamornog habanja na površini livenog gvožđa