

DK 621.891

Sodobna mnenja o trenju, mazanju in obrabi¹

ALBERT STRUNA

Trenje, obraba in mazanje so pojavi, ki imajo v tehniki in tehniškem gospodarstvu mnogo večji pomen, kakor je splošno znano. Zaradi odvisnosti od mnogih pogojev, predvsem pa od obratovalnih okoliščin, se pojavljajo na drsnih ploskvah zelo različne oblike trenja in obrabe. Slednje je treba zmanjšati s posebnimi ukrepi, kolikor je sploh mogoče, tako da zasega na tem področju v tehniko zelo obširna veda o mazanju.

Razlikovati je treba tri različne vrste trenja, in sicer suho, mejno in tekočinsko, za kakršne so značilni posamezni vzroki in posledice. Mešano trenje je umesna stopnja, na katero se bomo povrnila pozneje.

1. Trenje

Za fizikalno proučevanje suhega trenja je potrebno znanje o strukturi materialov vobče, predvsem seveda o ležajnih kovinah. Za malone vse kovine so značilne čisto določene kristalne oblike. Posamezni sestavni delci, atomi ali ioni, so v redno ponavljajočih se razdaljah in na povsem določenih mestih v omrežju kristalov.

Proučevanje kristalizacije kovin zadeva n. pr. strukturo in stabilnost površin pri znanem kristalnem omrežju². Razširjene preiskave pa se nanašajo na ravnotežne oblike nižjih dimenzij kakor so ploskovna ali verižna jedra v omrežju, pri čemer izsledki ne

opisujejo le nazadnje doseženega stanja, marveč tudi mehanizem vseh vmesnih pojavov.

Kot primer »kristalnega omrežja« je na sliki 1 a prikazana kubična elementarna celica. Iz izredno velikega števila takih celic so sestavljeni posamezni kristali. V realnih kristalih pa so včasih nekatera »redna« mesta nezasedena, tako da jih lahko imenujemo razrahljana. V drugem primeru pa so nekateri atomi na vmesnih prostorih, kakršna označujemo kot napačna.

Zaradi razrahljanosti in napačnih mest je mehanična vrednost kristala manjša od trdnosti, ki bi sicer izhajala iz teoretično izračunanih sil v omrežju.

Delec kristala, ki je prikazan na sliki 1 a, ima idealno gladke ploskve. Za drsne pojave je največjega pomena razvrstitev atomov na površini.

Atom iz notranjosti kovine, slika 1 b, je vezan na šest nasprotno nabitih atomov. Če pa na površini zgornji atom manjka, slika 1 c, deluje le pet vezi. Taka skupina je električno nenasičena, ker ima za vezavo z enim atomom še prosto energijo. Tako nastale nevezane površinske napetosti so odločilne za drsne pojave pri kovinah in zato tudi pri mazanju.

Če drsita dve idealno gladki površini druga po drugi, je treba s tornim delom premagovati proste površinske napetosti oz. sile. Površinski atomi ene kovine prihajajo pri drsenju v območje sil, ki jih povzročajo atomi na površini druge. Za drsno gibanje potrebna sila mora biti večja od privlačnih sil omejenih atomov.

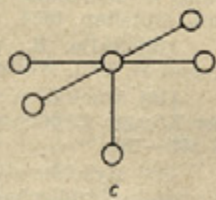
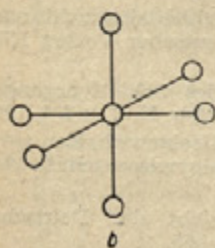
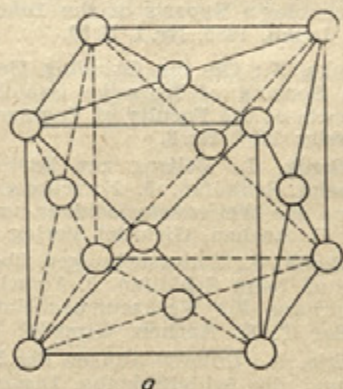
Kako majhen obseg imajo idealno gladke površine, je razvidno z znane slike pod mikroskopom, ki prikazuje obdelano površino in je videti kot miniaturno pogorje. Trdnost površine je določena s silami omrežja in obdelovalnim postopkom. Ker znašajo v kristalnem omrežju dimenzije le nekoliko Å (angstromov, $1 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ mm}$), je razumljivo, da se pri obdelovanju iztrgujejo neenakomerni delci in kosi, skratka mnogo več kakor samo kristali. Pri kakršnem koli poliranju (n. pr. pri lepanju) se trdnost površine poveča. Pri teh postopkih se namreč vrhovi površinskega »pogorja« skupno s polirnim sredstvom vtiskajo v miniaturne »doline«. Pri tem nastaja lahko tudi hladno varjenje, ki povzroča večjo gostoto materiala in ojačenje površine vobče.

Kadar se pri drsnem gibanju dotikajo vrhovi površinskega »pogorja«, je zaradi strižnih uporov potrebna večja gibalna sila. Posnemanje konic po mehanični poti in pačenje napetostnega polja idealnih kristalov je zelo težko ločiti, ker nastaja drobljenje kristalov tudi zaradi površinskih napetosti.

Opisana vrsta suhega trenja pa je mogoča samo teoretično. Obdelane površine vseh vrst imajo vselej kakršno koli prevleko, kakršno povzročajo vlaga, oksidi, polirna sredstva in mnogokrat tudi olje. V tem primeru prehaja suho trenje v mejno. Proste površinske sile pri mejnem trenju ne izgubljajo pomena.

Kako so važne, potrjuje primer, da se k umetnim snovem za ležajne skodelice že pri izdelovanju dodajajo aktivna sredstva, s kakršnimi postajajo drsne ploskve omočljive.

Fizikalna razlaga mejnega trenja. Mejno trenje je torni upor, ki se pojavlja med drsnima ploskvama



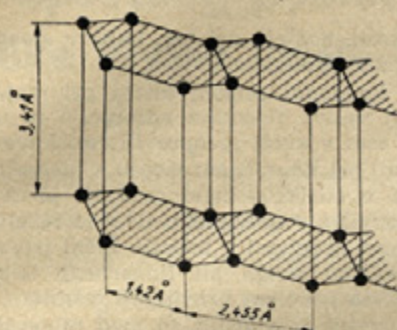
Sl. 1. Kubična kristalna rešetka

- a — kristalno omrežje,
- b — vezanje atoma iz notranjosti kovine,
- c — električno nenasičena skupina atomov.

¹ Sestavek je posnet iz poročil, ki so bila dana na konferenci o trenju in mazanju v Darmstadtu leta 1956 (VDI-Tagung) in leta 1957 v Londonu (Conference on Lubrication and Wear).

² Z naslovom »Suvremena mišljenja o pitanjima trenja, podmazivanja i otrošenja« je bil članek objavljen v reviji »Zaštita materijala«, Beograd, god. VI., br. 10.

² Darmstadt: Stranski J. N. Eigenschaften der Kristalloberflächen.



Sl. 2. Kristal grafita

zaradi molekularnih sil, če je med njima še »tretja« snov, praviloma nekaj maziva, in se kovinski površini še ne dotikata. Trenje je odvisno od medsebojnega vpliva molekul kovine in mejnih molekul maziva. Trenje je lahko že zelo veliko in tudi obraba je mogoča, vendar pa o tem še najbolj odloča vrsta oziroma kakovost maziva. Iz lastnosti maziv pri mejnem trenju so mogoči zaključki o mazalnih lastnostih določenega sredstva nasploh.

Olja za mazanje, naravna in sintetična, imajo zelo različno molekularno strukturo. Molekule so razvrščene v obliki verig, obročev ali pa so te osnovne oblike kombinirane in imajo še odcepe.

Pri molekulah različne oblike v istem olju je molekularna konstitucija označena s tem, da so kot najznačilnejše omenjene molekule, ki so v povprečju najštevilnejše.

Če uporabimo v določenem ležaju dve vrsti olja enake viskoznosti, toda različne kemične konstitucije, bomo lahko ugotovili, da je mazalni učinek različen, prav posebno še pri mejnem trenju oz. zasilnem teku s premajhno količino maziva. Fizikalna razlaga tega pojava je najpomembnejša pri izbiri maziv in ležajnih kovin.

Če je za ležajno kovino izbrana snov, ki ima na površini mnogo električno nenasičenih atomov, se — po prejšnjih pojasnilih — na njih nabirajo delci maziva, ki električno niso povsem nevtralni. Take so molekule maziv, ker skoraj vse vsebujejo polarne skupine, se pravi take, da se v njih težišča pozitivnih in negativnih nabojev ne ujemajo.

Trenje med kovinskimi delci, na katerih so nabrane molekule maziv, je vsekakor mnogo manjše od teoretičnega suhega trenja. V skrajnem primeru, t. j. pri monomolekularnih plasteh drse drug po drugem kakor na ščetki razporejeni ogljikovodiki. V nadaljnjem pa je nosilnost odvisna tudi še od tangencialnih sil v molekulah, se pravi sil, ki delujejo vzporedno z drsnimi površinami. Tangencialne sile so tem večje, kolikor plastoviteje so razvrščene molekule.

Za primer lahko omenimo kristale grafita, pri katerih so sile med posameznimi delci v tangencialni smeri večje od sil, navpičnih na to smer, slika 2.

Pri mejnem mazanju se torej preprečuje neposredni stik kovin z »mejo«, ki je n. pr. pri grafitu utemeljena s fizikalnimi pojavi. Pri grafitiranih površinah se drsni pojavi ne pojavljajo med delci ležajnih skodelic in tečajev, marveč samo med delci grafita³.

³ Glej: Reibung, Schmierung und Verschleiss. Heft 1. Grundlegende Probleme. Von Dr. Ing. Pietsch und Dr. Ing. v. Schlessl. Fachbuchverlag GmbH. Leipzig 1952.

Pri tekočinskem trenju so torni pojavi odvisni samo še od maziva, tako da je struktura drsnih površin komaj ali kakor koli odločujoča. Ker so obraba in torne izgube v tem primeru najmanjše, je tekočinsko trenje najprimernejše in ga je treba doseči, kjer koli je le mogoče. Znano pa je, da je dosegljivo samo z ozkim mazalnim klinom in določeno relativno hitrostjo, ki povzročata primeren oljni tlak.

O tem bo še več podrobnega v posebnem poglavju o hidrodinamični teoriji trenja.

Posebna zvrst trenja je **mešano trenje**, ki pomeni kombinacijo tekočinskega, mejnega in tudi praktično suhega trenja ter nastaja pri zaganjanju in ustavljanju strojev pa tudi pri ležajih s premajhno vrtilno hitrostjo. Pri mešanem trenju je obraba neizbežna.

2. Maziva za mejne pogoje

2.1 Trdna mejna maziva

O grafitu je pri roki razprava⁴, iz katere izhaja, da je torni koeficient grafita pri sobni temperaturi zelo majhen in s temperaturo narašča do okoli 100 °C. S tem je potrjeno mnenje (Savage, 1948), da grafit dobro maže, dokler obstajajo absorbirni filmi, n. pr. vodni. Pri nadaljnjem višanju temperature ostaja torni koeficient konstanten, začne pa se zmanjševati med 427 oz. 454 °C, tako da pri 538 °C doseže spet vrednost, kakršno je imel pri sobni temperaturi. Iz tega izvira utemeljena domneva, da začne grafit mazati tudi brez vodnih absorbirnih filmov, če je na kovinsko površino vezan s pomočjo oksidne obloge.

Z mehkim kovinskimi oksidi (n. pr. kadmijevim ali svinčevim) pomešani grafit zboljšuje mejno mazanje pri nizkih temperaturah.

Mnogo boljše je mejno mazanje z **molibdenovim disulfidom**, ker zanj niso potrebni posebni pogoji za prijetanje na drsne ploskve. Iz razprave⁵, ki je bila omenjena uvodoma, izhaja, da izkazujejo v posebno preizkusno napravo vgrajeni kroglični ležaji pri zraku zelo majhno trenje do 400 °C. Nad to temperaturo pa molibdenov trioksid in žveplene spojine začnejo razjedati bronasto kletko ležaja. Pri krogličnih ležajih v dušiku je bilo doseženo majhno trenje do 538 °C.

V dopolnitev je vredno omeniti še nadaljnje ugotovitve⁶, da je torni koeficient molibdenovega disulfida majhen do 800 °C v vakuumu in je ta sestavina izvrstno mejno mazivo, ne da bi bili potrebni posebni absorbirni vodni hlapi, kisik ali kovinski oksidi.

Se učinkovitejše je mejno mazanje z molibdenovim disulfidom, če se jeklo fosfatira in nato »impregnira« s suspenzijo MoS_2 v tekočini, ki med vtiranjem trdnega maziva v površino postopoma izhlapi⁷.

V območju praktično potrebnih temperatur so nekatere **mehke kovine**, n. pr. svinec, kositer in indij že same uporabne kot mejna maziva. Praktični pomen te lastnosti se je pokazal pri izdelovanju cevi in žice.

Na uporabo **politetrafluoroetilena** (P. T. F. E.) za mejne namene sta že leta 1952 opozorila Bowden in Love. Zadnja razprava o tem⁸ je zaključena z mnenjem, da je učinkovanje plastičnega P. T. F. E. po-

⁴ London 1937/23: Bisson E. E., Johnson R. L. in Anderson W. Z.: Friction and Lubrication with solid lubricants at temperatures to 1000 °C with particular reference to graphite.

⁵ London 1957/3: Rowe G. W. Vapour Lubrication and the friction of the clean surface.

⁶ London 1957/27: Mitchell D. C. in Fulford B. Wear of Selected Molybdenum disulphide Lubricated Solids and Surface Film.

⁷ London 1957/74: Mitchell D. C. The Wear of P. T. F. E. Impregnated metal bearing materials.

dobno svinčeni fazi v ležajni zlitini iz bakra in svinca. Pri tem je P. T. F. E. vdolan v luknjičavo delovno površino, ki mora imeti dovolj veliko toplotno prehodnost, kakor n. pr. baker. Pri majhnih hitrostih je torni koeficient najmanjši med vrednostmi, ugotovljenimi pri mejnem trenju (približno 0,05). Pri večjih hitrostih se trenje sicer povečuje, vendar ne presega vrednosti, kakršne izkazujejo tudi druge plastične snovi.

Razprave drugih avtorjev* se ujemajo v zaključkih, da je P. T. F. E. najboljše plastično mejno mazivo do temperature okoli 400 °C.

2.2. Oljna mejna maziva

Mejna lamelarna maziva, se pravi grafit, molibdenov disulfid in P. T. F. E. so še zlasti učinkovita, če so suspendirana v tekočini, ki je primerna tudi za hidrodinamično mazanje. Za prakso so izsledki najuporabnejši pri mazanju hipoidnih zobnikov.

Razen dodatkov, ki so že tako mejna maziva, se lahko dodajajo tudi še aditivi, ki sicer nimajo mazalnih lastnosti niti v mejnih niti v hidrodinamičnih pogojih. Zato pa aditivi kemično reagirajo z eno izmed drsnih ploskev in na njej napravljajo mejno mazivo.

Za najpreprostejši primer lahko omenimo dodatek stearinske kisline k (ogljikovodikovemu) mineralnemu

olju. Z bakrom nastaja pri tem bakrov stearat z zelo majhno strižno trdnostjo.

Razen kemičnih reakcij imata pri mejnem mazanju nekaj vpliva fizikalna adsorpcija in usmeritev molekul. S tem v zvezi so opravili raziskave z žičnim tribometrom⁹ pri kinetičnem trenju z utemeljitvijo, da preizkušnja v štirikrogelnem aparatu, slika 3, ki se večkrat uporablja v te namene, daje le rezultate glede na trenje med krogli v točkah. Žični tribometer pa upošteva dolžino striga ali linearnega stika, ki še najbolj ustreza pogojem pri drsnih ležajih.

Raziskovanje privlačnih sil med mineralnimi olji in jeklenimi tornimi površinami je pokazalo, da so kemične reakcije vendar najbolj odločilne¹⁰. Glede tega zavzemajo maščobna olja prvo mesto¹¹, toda tudi kemično inertne tekočine puščajo na drsnih ploskvah plast, ki ima pri mejnem mazanju določen pomen.

2.3. Suspenzije kovinskih mil

Mila v tehničnih masteh v načelu ne pomagajo zboljšati mejno mazanje, ker daje mast le tiste reološke lastnosti, kakršne so vobče potrebne za mazanje z mastjo. Mimo tega načela pa je le dokazano, da milo vendarle podpira mejno mazanje¹².

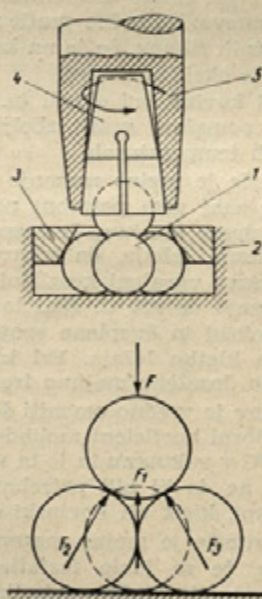
2.4. Mazanje pri ekstremnih tlakih

Težave pri mazanju pri ekstremnih tlakih ne nastajajo zaradi tlakov samih, ampak zaradi temperature. Z naraščanjem temperature se doseže namreč tališče varovalnega filma, ki oksidira ali pa se uniči. Vsi organski dodatki imajo tališča okoli 100 do 120 °C, medtem ko anorganske snovi zdrže večkrat sto stopinj in so zato najprimernejše za maziva pri ekstremnih tlakih (angl. extreme pressure lubricants).

Za primere lahko omenimo mineralnemu olju pri-mešane klorizirane ogljikovodike, ki v težkih mejnih pogojih reagirajo z jekleno drsno površino. Pri tem nastajajo plasti iz zmesi železovih kloridov in oksikloridov (Finch 1950). O tem razpravlja že Rowe³, ki trdi, da imajo nekateri teh kloridov plastovito strukturo z majhno strižno trdnostjo do 300 ali 400 °C.

Po Campbellu¹³ ustrezajo enakim namenom sulfidni filmi, ki nastajajo zaradi reakcije določene žveplove spojine ali v olju razpršenega žvepla z jeklom, in sicer zaradi dovolj visoke temperature. Železovi sulfidi mažejo jeklo do 800 °C (Bowden 1951).

Proučevanje mejnega mazanja in obrabe pri aluminiju je tudi pokazalo¹⁴, da mora mejno mazivo napravljati plast, ki ne sme navajati na zvarjenje kovin. Učinkovitost varovalnega filma je odvisna od kombinacije majhne strižne trdnosti z odpornostjo proti oksidaciji, razpadanju in taljenju.



Sl. 3. Štirikrogelni aparat (Shell)

Razmestitev preizkusnih krogel:

- 1 — preizkusne krogle,
- 2 — posoda za krogle,
- 3 — stožčasti zapiralni obroč,
- 4 — držalo za krogle,
- 5 — vreteno.

Razdelitev sil:

F — vertikalna obremenitev,

$F_1 = F_2 = F_3 = F/\sqrt{6}$ — posamezne sile v dotikališčih.

* London 1957/8: Booser E. R., Scott E. H. in Willcock D. F. Compatibility of Bearing Materials; London 1957/19: Atkins B. R., Griffiths D. P. Electrical Sliding Contacts and their Behaviour at High Altitudes; London 1957/101: Mitchell D. C., Pratt G. Friction, Wear and Physical Properties of Some Filled P. T. F. E. Bearing Materials.

⁹ London 1957/11: Lazarev V. P. in Derjagnin B. V. Investigation of Boundary Lubrication in Kinetic friction by means of a Wire-tribometer.

¹⁰ London 1957/1: Clayfield E. J., Mathews J. B. in Whittam T. V. The Importance of Oil-metal Adhesion in Lubrication.

¹¹ London 1957/29: Wilford A. T. Lubrication of Road Vehicle Engines and Worm-driven Axles with Particular Reference to Vehicle Fuel Consumption.

¹² London 1957/62: Milne A. A. in Cooke W. L. On the Influence of Grease Structure on Boundary Lubrication.

¹³ London 1957/61: Campbell R. B. Sulphur as an Extreme Pressure (E. P.) Lubricant.

¹⁴ London 1957/60: Wright K. H. R. in Scott H. M. Frictional Behaviour of Anodized Aluminium Surfaces.

(Nadaljevanje in konec prihodnjič)

Avtor: prof. ing. Albert Struna, Oddelek za strojništvo Univerze v Ljubljani