

## 7. PROMENA STANJA TRANSPORTNIH SREDSTAVA

Osnovu složenog sistema transportnog sredstva čini mehanički sistem koji obezbeđuje njegovu osnovnu funkciju. Za upravljanje i regulisanje rada mehaničkih podistema u sastavu transportnih sredstava nalazi se i veći broj uređaja koji imaju značajan broj električnih, odnosno elektronskih komponenata.

Promena stanja komponenata sa mehaničkom osnovom značajno utiče na postupke održavanja. Električne i elektronske komponente se često posmatraju kao nepopravljive. Zbog toga će se prilikom prikaza promene stanja, u okviru ovog udžbenika, posebna pažnja posvetiti komponentama sa mehaničkom osnovom.

Stanje pojedinih komponenti i uzajamna dejstva u njihovim parovima uslovljena su i okarakterisana geometrijskim, mehaničkim, fizičkim, hemijskim i drugim karakteristikama. Vrednosti ovih karakteristika (u literaturi nazvanih parametrima stanja) određuju stanje svakog dela, para i transportnog sredstva kao celine. Na primer, geometrijske karakteristike jednog cilindra mogu biti prečnik ( $d$ ) i dužina ( $L$ ). Ove karakteristične veličine nisu jednoznačne. Tako postoji:<sup>[B.8]</sup>

- $L_r$  – proračunska veličina,
- $L_k$  – zaokružena proračunska veličina (standardizacija, unifikacija, normalizacija),
- $L_{iz}$  – veličina prilagođena načinu izrade,
- $L_M$  – statički izmerena veličina sa greškom  $\Delta M$  – posle obrade i
- $L_e$  – veličina izmerena u procesu eksploatacije.

U procesu proizvodnje deluje niz stohastičkih uticaja, pa će vrednost  $L_M$  biti stohastična veličina koja se nalazi u okviru tolerantnog područja.

Po ulasku elementa u eksploataciju javlja se uticaj elastičnosti, zaostalih napona, trošenja, temperaturnog dejstva i slično, te je  $L_e = f(t)$ . Pored toga, stohastičnost  $L_M$  i svih navedenih uticaja uslovljavaju da i  $L_e$  bude stohastična veličina. Sličan je slučaj i sa drugim karakteristikama koje određuju stanje.

Konkretno transportno sredstvo se *projektuje za određene uslove rada – režime rada* određene raspodelama opterećenja pojedinih elemenata. Polazeći od ovoga, promena stanja može da bude:

- posledica rada u projektovanim uslovima i
- posledica rada u ekscenim uslovima.

Tokom rada transportnih sredstava može da dođe do *izlaska iz oblasti projektovanog režima rada* usled ekscenog povremenog preopterećenja elemenata transportnog sredstva. Ono je posledica:

- opterećenja preko dozvoljene nosivosti,
- udara zbog neravnina na podlozi,
- neodgovarajućih intervencija održavanja,
- nepravilnog rukovanja,
- udara u prepreke itd.

Sprovedena analiza učešća pojedinih uzročnika neispravnosti kod kinematskih parova<sup>1</sup> koji se najčešće sreću na transportnom sredstvu (Tabela 7.1) pokazuje da je kod ovih osnovnih elemenata preko 30% svih neispravnosti direktna posledica trošenja.<sup>[B.9]</sup> Potrebno je skrenuti pažnju na izuzetno veliki značaj pravilnog sprovođenja procesa eksploatacije, održavanja i kontrole (skoro 40% neispravnosti nastaje zbog tih nepravilnosti). Ostali uzročnici pojave neispravnosti su van direktnog uticaja korisnika transportnih sredstava.

Tabela 7.1. Učestalost neispravnosti i njihovi uzročnici

UZROCI NEISPRAVNOSTI	Zupčanici [%]	Klizni ležaji [%]	Kotrljajući ležaji [%]
Neadekvatan proračun i konstrukcija	6,9	9,1	13,8
Greške u materijalu	0,8	3,6	1,9
Greške proizvodnje i montaže	17,6	10,7	14,4
Neadekvatna eksploatacija, održavanje i kontrola	36,7	39,1	37,4
Trošenje materijala tokom dugotrajnog rada (tribološki procesi)	38,0	30,5	28,5
Ostalo	/	7,0	4,0

<sup>1</sup> Kinematski par čine dva čvrsta elementa u dodiru i relativnom kretanju.

Uopšte posmatrajući transportno sredstvo kao sistem, do promene stanja dolazi prvenstveno iz sledećih razloga:

- trošenje frikcionih parova – posledica rada trenja (kočione obloge, obloge diska spojnice, pneumatici);
- trošenje „parova trenja“ (klizni i kotrljajući ležajevi, zupčanici, lančanici);
- korozija metalnih delova;
- zamor (vratila, osovine, nosači);
- starenje (nemetalni delovi);
- hemijske i mehaničke promene tečnosti (ulja i rashladne tečnosti);
- greške u samom delu i
- preopterećenja.

Kako je trošenje jedan od najznačajnijih uzročnika promene stanja i kako se na proces trošenja može uticati tokom eksploatacionog perioda transportnog sredstva, ovde će trošenju biti posvećena posebna pažnja. Korozija i zamor će se samo definisati, dok se ostali uzročnici neće posebno obrađivati.

## 7.1. Trošenje

Trošenje, jedan od osnovnih uzročnika promene stanja transportnih sredstava, predmet je proučavanja tribologije<sup>[B.8]</sup> nauke o trenju, trošenju, podmazivanju i uzajamnom delovanju površina u dodiru, pri njihovom uzajamnom pomeranju.

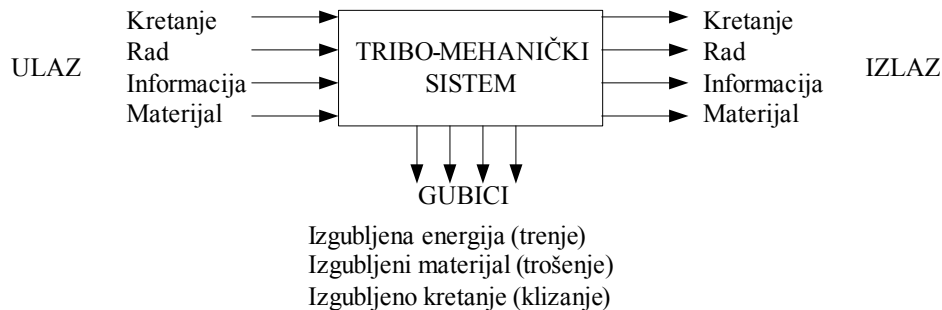
Transportno sredstvo sadrži više hiljada tribomehaničkih sistema. To su sistemi čije funkcionalno ponašanje zavisi od interakcije površina u dodiru koje se relativno kreću jedna po drugoj.<sup>[B.10]</sup> Svi tribomehanički sistemi koji se javljaju kod transportnih sredstava mogu da se svrstaju u tri grupe:<sup>[B.10]</sup>

- Podsklopovi u kojima se vrši vođenje kretanja jednog elementa po drugom (klizni ležajevi, klizne vodice).
- Sistemi kojima se vrši prenos energije i rada (zupčasti prenosnici, kaišnici i drugo).
- Sistemi kojima se prenose informacije (breg i podizač, električni kontakti).

U osnovi, tribomehanički sistem bilo koje vrste može da se predstavi kao „crna kutija“ sa ulazima, izlazima i gubicima<sup>[B.10]</sup> (Slika 7.1).

Proces pretvaranja ulaznih u izlazne veličine prati se preko vrednosti sile ili momenta, dimenzije (pozicije), temperature i karakteristika materijala.

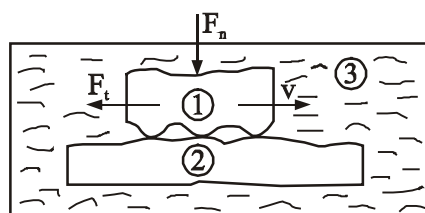
Često se u istom cilju posmatraju izvedene veličine: snaga (intenzitet rada), brzina (obimna ili linearna), intenzitet prenosa toplote, intenzitet prenosa mase i druge.



Slika 7.1. Šematski prikaz tribomehaničkog sistema

U tribomehaničkim sistemima odigravaju se, u zonama kontakta između čvrstih elemenata, dva procesa:<sup>[B.10]</sup>

- *Formiraju se i raskidaju frikcione veze* u zoni kontakta (proces trenja) po vrhovima neravnina oba tela u dodiru (neravnine postoje i kod najfinije obrade površina).



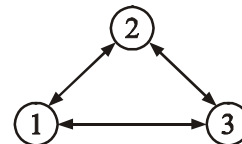
Legenda:

- – frikciona veza,
- $F_n$  – spoljašnje opterećenje,
- $v$  – brzina kretanja elementa 1 po elementu 2,
- $F_t$  – sila trenja

Slika 7.2. Tribomehanički sistem

Slika 7.2 predstavlja tribomehanički sistem čiji su elementi 1 i 2 čvrsti, a 3 je mazivo. Da bi kretanje elementa 1 po elementu 2 moglo da bude ostvareno neophodno je utrošiti odgovarajuću količinu rada (energije) na raskidanje formiranih frikcionih veza. Kako proces formiranja frikcionih veza i njihovo raskidanje neprekidno traje u toku ostvarivanja kontakta i kretanja jednog elementa po drugom, to je za sve vreme rada tribomehaničkog sistema neophodno trošiti jedan deo energije na savlađivanje trenja (proces raskidanja frikcionih veza). Tako u jednom sistemu kakvo je transportno sredstvo može i polovina utrošene energije da se raspe usled pojave trenja. Smanjenje rasipanja energije usled trenja postiže se *podmazivanjem*.

- U procesu ostvarivanja kontakta dolazi i do *prenosa (kretanja)* masa sa jednog elementa na drugi, što je šematski prikazano na slici 7.3



Slika 7.3. Šema kretanja masa u tribomehaničkom sistemu

Posledice kretanja masa u tribomehaničkim sistemima za vreme ostvarivanja kontakta između njegovih elemenata, odnosno za vreme funkcionisanja sistema, pojavljuju se na sva tri elementa sistema. Na svakom od tri elementa nalaze se čestice ostala dva. Na čvrstim elementima (1 i 2) sistema dolazi do promene masa i dimenzija, odnosno do razvoja procesa trošenja.

Promena čvrstih elemenata sistema dovodi vremenom do njihove nesposobnosti da vrše svoju funkciju, odnosno do prekida rada tribomehaničkog sistema. Zamenom pohabanog elementa novim, tribomehanički sistem ponovo postaje sposoban da dalje vrši svoju funkciju. Znači da se radi o popravljivom sistemu.

Posle određenog perioda rada tribomehaničkog sistema, u mazivu se pojavuje čestice mase oba čvrsta elementa u dodiru, a dolazi i do promena osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika maziva kao što su viskozitet, pH vrednost i slično. Zbog promena fizičko-hemijskih karakteristika i neprekidnog porasta sadržaja čestica mase čvrstih tela, mazivo vremenom postaje nedovoljno kvalitetno sa gledišta vršenja svoje funkcije (podmazivanje i odvođenje toplote), tako da mora da dođe i do njegove promene. Ovo znači da i mazivo, treći element sistema, vremenom postaje „istrošeno“ kao i oba čvrsta elementa u dodiru. Pri dostizanju „kritične istrošenosti“ mazivo se menja, kao i čvrsti elementi sistema.

U tribomehaničkim sistemima svih vrsta za vreme funkcionisanja nije moguće zaustaviti ni proces trenja, ni proces trošenja. Moguće je smanjiti trenje i realizovati proces trošenja tako da se dobije manje rasipanje energije u sistemu i duži vek trajanja elemenata sistema.

Mazivo se, kao treći element tribomehaničkih sistema, nalazi u sistemu radi:

- smanjenja trenja u zoni kontakta i
- usporavanja procesa trošenja elemenata u dodiru.

Ovo znači da je osnovna funkcija maziva u ovom sistemu tribološka. Zato se tribološkim svojstvima maziva poklanja velika pažnja.

U odnosu na postojanje sloja maziva, moguća su dva karakteristična slučaja trenja:

- suvo trenje i
- trenje sa mazivom.

### 7.1.1. Suvo trenje

Suvo trenje se javlja kad ne postoji treći element tribomehaničkog sistema. U ovom slučaju veličina stvarne dodirne površine ima poseban značaj jer određuje veličinu specifičnih pritisaka s obzirom na to da se sila koju jedan par prenosi raspodeljuje na stvarnu površinu dodira. Stvarnu dodirnu površinu određuje kvalitet obrade te površine. Znači da iste geometrijske dodirne površine mogu, u

zavisnosti od finoće obrade (ili sprovedenog procesa uhodavanja), da imaju različite stvarne dodirne površine.

Veliki specifični pritisci izazivaju visoke temperature koje mogu da dovedu do molekularnog vezivanja dvaju elemenata. Ove veze se nazivaju mikro-varovima. U procesu relativnog pomeranja elemenata posle mikro-zavarivanja dolazi do kidanja varova i putem smicanja do otkidanja čestica.

Na otpor trenja utiču i:

- molekularne veze koje se svode na privlačne sile površinskih molekula (adhezija dodirnih površina) i
- brazdanje pod kojim se podrazumeva utiskivanje vrhova profila tvrdog elementa u površinu mekšeg, pri čemu se zbog relativnog pomeranja tih elemenata stvaraju brazde.

U realnoj sredini uvek postoji treći sloj: vlaga ili prašina u vazduhu, te se čisto suvo trenje može ostvariti samo u laboratorijskim uslovima.

Pojava uslovno suvog trenja se javlja npr. kod spojnice i kod kočnica.

### 7.1.2. Trenje sa mazivom

Trenje sa mazivom se javlja u slučajevima kad postoji mazivo kao treći element tribomehničkog sistema. Zavisno od vrste i debljine sloja maziva moguća je pojava:

- hidrodinamičkog podmazivanja,
- graničnog podmazivanja i
- EP-podmazivanja.

**Hidrodinamičko podmazivanje** se javlja onda kada se stvore uslovi da su kontaktne površine razdvojene stalnim neprekinutim slojem maziva. Nema direktnog dodirivanja metalnih površina, a to znači da nema ni površinskog trenja između metalnih površina.

To je slučaj kada debljina uljanog filma ( $h$ ) u potpunosti odvajaju površine elemenata u paru, tj. veća je od sume visina neravnina mikroprofila jednog i drugog elementa ( $\delta_1, \delta_2$ )

$$h > \delta_{1\max} + \delta_{2\max} \quad (7.1)$$

Svaki fluid, usled unutrašnjeg trenja, pruža otpor relativnom pomeranju svojih čestica srazmerno brzini tog kretanja. Trenje u najvećoj meri zavisi od viskoziteta ulja. Uticaj temperature na viskozitet određen je indeksom viskoziteta.

Hidrodinamičko podmazivanje se javlja kod kliznih ležajeva i sl.

**Granično podmazivanje** je podmazivanje koje se javlja između kliznih površina onda kada postoji veoma tanak sloj uljanog filma (reda veličine  $0,1 \mu\text{m}$ ). Ovakav sloj maziva ne vrši funkciju smanjivanja trenja na isti način kao kod hidrodinamičkog podmazivanja. Ovde mazivo ne dovodi do razdvajanja čvrstih površina već do promene uslova trenja. Tako je kod graničnog podmazivanja osnovni kvalitet maziva mazivost. Ona se izražava kroz osobinu maziva da penetrira i adsorbira (površinski se vezuje) u neravnine mikroprofila na metalnim površinama. Ta osobina se ostvaruje aditivima koji omogućavaju stvaranje polariteta kod molekula maziva.

Tipični primeri graničnog podmazivanja su: klip-cilindar, vođica ventila (ventil) i slično. Svi ležajevi koji se inače hidrodinamički podmazuju, pri startovanju motora rade u uslovima graničnog podmazivanja.

**EP<sup>2</sup> podmazivanje** je podmazivanje u uslovima ekstremno visokih pritisaka. Zahteva specijalna ulja sa hemijskim supstancama koje se na mestima visokih pritisaka, a to znaci i visokih temperatura, hemijski vezuju sa metalnim površinama elemenata koje treba da štite, stvarajući tvrde spojeve sa metalom u formi sulfida, fosfida i hlorida. Funkcija ulja u ovom slučaju se svodi na funkciju transportovanja aditiva do mesta gde se javljaju pritisci. Ovakvi slučajevi podmazivanja se javljaju u diferencijalu (prenos snage sa konusnog na tanjirasti zupčanik), u menjaču i sl.

### 7.1.3. Uslovi za pojavu hidrodinamičkog podmazivanja

Sa aspekta trajnosti najpovoljniji su uslovi hidrodinamičkog podmazivanja jer u tim uslovima metalne površine nisu u direktnom dodiru.

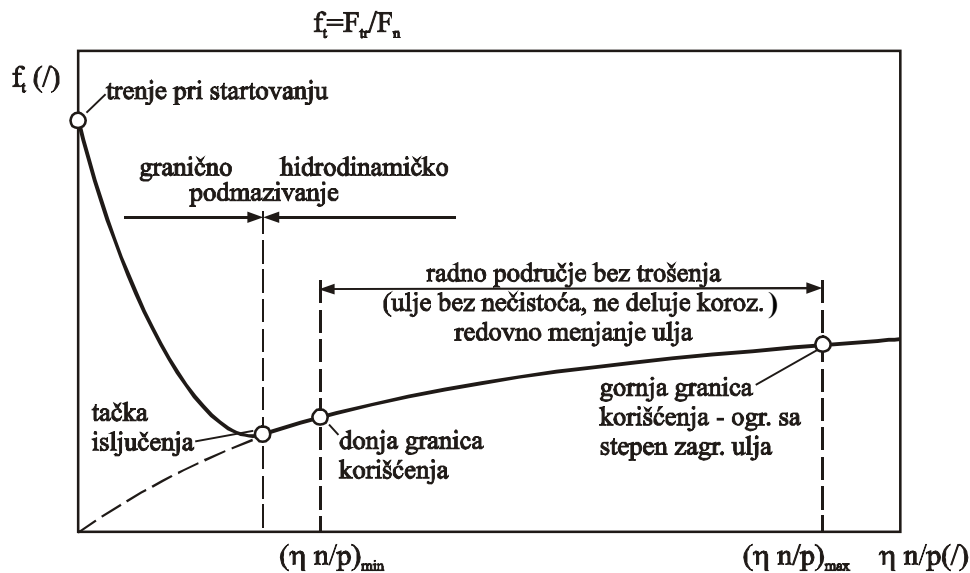
Istraživanjima je uspostavljena zavisnost između koeficijenta trenja ( $f_i$ ) sa jedne strane i viskoziteta maziva ( $\eta$ ), broja obrtaja rukavca ( $n$ ) i pritiska ( $p$ ) (sila na površinu projekcije ležaja) sa druge strane. Zavisnost se iskazuje tzv. Strajbekovom krivom (Slika 7.4) koja se određuje pri radu konkretnog kliznog ležaja u stacionarnim režimima rada.<sup>[B.11]</sup> Posmatranjem krive mogu da se uoče sledeće činjenice:

- maksimalna vrednost trenja je „pri startovanju“ jer je tada u najvećoj meri istisnut uljani film između dodirnih površina (Slika 2.5),
- sa pokretanjem rukavca (raste  $n$ ) uljani film postaje sve deblji i u „tački isključenja“ dolazi do potpunog razdvajanja dodirnih površina (postize se minimalno trenje),
- „donja granica korišćenja“ je, zbog mogućih nestabilnosti procesa, pomerena malo udesno,

---

<sup>2</sup> Extended Pressure (EP)

- „gornja granica korišćenja“ je ograničena međumolekularnim trenjem, blago se povećava od „tačke isključenja“ i kao prateću pojavu ima zagrevanje.



Slika 7.4. Stribekova kriva

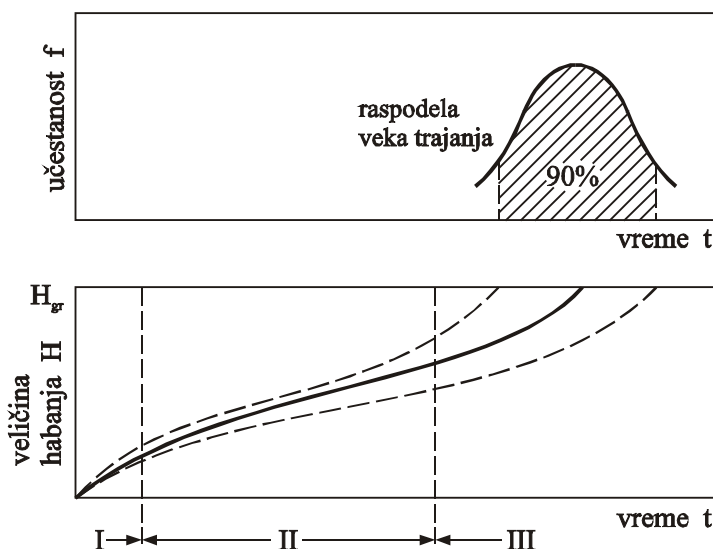
U realnim uslovima dolazi do stalnih promena režima opterećenja, brzine i temperature, a to znači do stalnih promena pritiska ( $p$ ), broja obrtaja ( $n$ ) i u manjoj meri viskoziteta ( $\eta$ ). Problem konstruktora je da pri najčešće zastupljenim režimima rada obezbede hidrodinamičko podmazivanje. No, i kod najpovoljnijih konstrukcionih rešenja pri startovanju i pri velikim promenama u režimima rada ležaj će ući u stanje graničnog podmazivanja.

#### 7.1.4. Promena karaktera trošenja tokom rada tribomehaničkih sistema

Veličinu trošenja, kada se posmatra u funkciji vremena rada tribomehaničkog sistema, karakterišu tri oblasti koje se obično označavaju kao inicijalno, stacionarno i intenzivno trošenje (Slika 7.5).<sup>[B.9]</sup>

Inicijalno trošenje (period I, Slika 7.5) obuhvata period uhodavanja tokom koga se vrši prilagođavanje površina. Period stacionarnog trošenja (II) karakteriše se stalnim gubitkom materijala u jedinici vremena i nepromenljivim tribološkim procesima koji se odigravaju na površinama sprežanja. U području intenzivnog trošenja (III) priraštaj gubitka materijala raste sa vremenom. U ovoj oblasti dolazi do promena u procesu trošenja, a oštećenja površina su izrazita.





Slika 7.5. Opšta zavisnost veličine trošenja od vremena i raspodela veka trošenja

Kod pravilno konstruisanih i održavanih sistema periodi prate jedan drugi. Ako se sa  $H_{gr}$  označi granica dozvoljenog trošenja, do koje sistem zadovoljava svoje izvršava svoju funkciju, prelaskom te veličine sistem gubi svoje performanse i nastaje neispravnost. Ponovljena merenja ili praćenje određenog uzorka daju odstupanja, što je prikazano isprekidanim linijama (Slika 7.5). Oblast između isprekidanih linija obuhvata obično 90% posmatranog uzorka.

Vreme dostizanja vrednosti  $H_{gr}$  kod pojedinih elemenata posmatranog uzorka biće različito i daće neku raspodelu (Slika 7.5) – raspodelu veka trajanja.

### 7.1.5. Klasifikacija trošenja

Zavisno od konstrukcije i radnih uslova razlikuje se:<sup>[B.9]</sup>

- trošenje materijala pri klizanju suvih površina (kočnice, spojnice),
- trošenje materijala pri klizanju podmazivanih površina (vođice, klizni ležaji, par klip-cilindar),
- trošenje materijala pri kotrljanju podmazivanih površina (kotrljajni ležaji, zupčasti prenosnici),
- trošenje materijala pri kotrljanju suvih površina (šina-točak),
- trošenje materijala pri kretanju čvrstih čestica (cevovodi, uređaji za transport materijala) i
- trošenje materijala pri strujanju fluida (strujne mašine, cevovodi).

U pojedinim slučajevima istovremeno deluju različiti mehanizmi trošenja ili prate jedan drugi, što čini trošenje izuzetno složenim procesom. Osnovni mehanizmi koji dovode do trošenja su: adhezija, abrazija, zamor materijala i hemijski procesi na površinama. Oni definišu većinu osnovnih vrsta trošenja.

Prema uzročnicima i manifestacijama razlikuju se sledeće vrste trošenja:

- adhezivno trošenje,
- abrazivno trošenje,
- trošenje usled površinskog zamora,
- eroziono trošenje,
- kavitaciono trošenje,
- fretting,
- oksidaciono trošenje i
- trošenje usled procesa korozije.

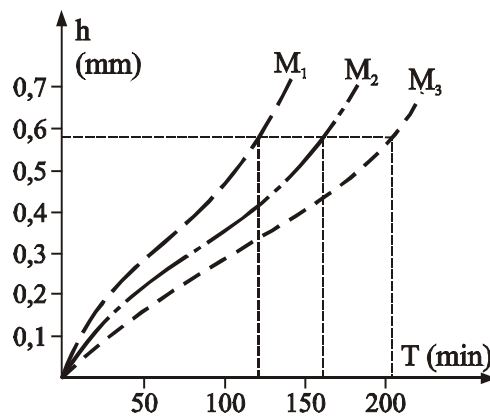
Kod većine navedenih vrsta trošenja, izuzev oksidacionog i korozionog, preovlađuju mehanički procesi, pa se često za njih koristi termin mehaničko trošenje ili habanje.

#### 7.1.6. Tribološka svojstva maziva

Tribološke karakteristike maziva kao trećeg elementa tribomehaničkog sistema određene su vremenom trajanja rada sistema do pojave kritične pohabanosti jednog od njegovih elemenata.<sup>[B.10]</sup> Vreme funkcionisanja tribomehaničkog sistema (efektivno vreme rada) meri se vremenskim jedinicama (minutima ili časovima) i naziva se vek trajanja tribomehaničkog sistema ili vek trajanja jednog od njegovih elemenata (kritični element sistema). Da bi mogao da se odredi vek trajanja tribomehaničkog sistema, odnosno da bi se izmerilo vreme rada sistema do pojave kritične pohabanosti jednog od njegovih elemenata pri korišćenju više vrsta maziva, neophodno je odrediti:<sup>[B.10]</sup>

- element sistema na kome se javlja kritična pohabanost,
- parametar trošenja sa kojim se prati razvoj procesa trošenja na kritičnom elementu sistema (može biti zapreminski, površinski ili linijski),
- vrednost parametra trošenja pri kome se element sistema smatra kritično pohabanim i zaustavlja rad tribomehaničkog sistema radi zamene pohabanog elementa novim i
- krive trošenja koje reprezentuju razvoj procesa trošenja pri različitim uslovima rada sistema.

Pri projektovanju mašina i uređaja, odnosno pojedinih njihovih podsklopova, u kojima su sadržani tribomehanički sistemi (npr. ležište-osovina, kaiš-kaišnik, breg-podizač i slično) određuje se uvek element sistema koji će biti prvi istrošen i koji može da bude lako zamenjen. Ovo znači da se već pri projektovanju tribomehaničkog sistema vrši izbor elemenata na kome će se pojaviti kritična istrošenost. Parametar trošenja bira se u toku eksploatacije tribomehaničkog sistema. Izbor parametara trošenja zavisi od primenjene metode i raspoloživih uređaja za praćenje razvoja procesa trošenja. Ako je tribomehanički sistem otvoren tako da omogućava prilaz i merenje pojedinih dimenzija elemenata tribomehaničkih sistema na kojima se javlja kritična istrošenost, obično se kao parametar trošenja bira linijski parametar čijom se promenom prati promena jedne dimenzije elementa sistema ( $h$  u mm, Slika 7.6).



Slika 7.6. Promena parametara trošenja

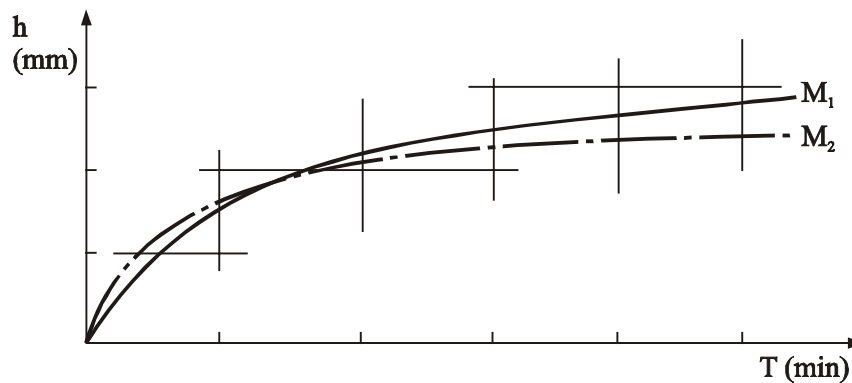
Bilo koji parametar trošenja da je izabran, njegova se promena tokom vremena rada sistema registruje u koordinatnom sistemu kao što je prikazano krivama  $M_1$ ,  $M_2$  i  $M_3$  (za tri različita maziva) (Slika 7.6).<sup>[B.10]</sup>

Mazivo koje za određenu kritičnu pohabanost  $h_k$  omogućava najduži vek rada tribomehaničkog sistema (u posmatranom slučaju mazivo  $M_3$  omogućava najduži vek  $T_3$ ) jeste i mazivo sa najboljim tribološkim karakteristikama.

Važno je primetiti da odnos između triboloških karakteristika maziva nije konstantan. Isto mazivo može da pokaže bolju ( $M_1$ ) ili lošiju ( $M_2$ ) tribološku karakteristiku u fazi inicijalnog trošenja, a lošiju odnosno bolju u drugoj fazi trošenja, u kojoj se dozvoljava da pohabanost kritičnog elementa bude veća (Slika 7.7).<sup>[B.10]</sup>

Usled promene triboloških svojstava neophodno je vršiti ispitivanja maziva tokom celog perioda rada tribomehaničkih sistema.

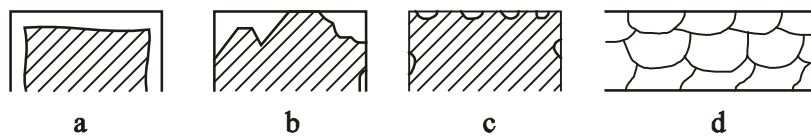
Tribološka svojstva maziva u velikoj meri zavise od uslova pod kojima tribomehanički sistem funkcioniše. Na primer, maziva sa tzv. EP-aditivima pokazuju svoja dobra tribološka svojstva u uslovima rada sistema koje karakterišu visoki kontaktni pritisci. Ako su pritisci mali, prednost EP-maziva nad mazivima bez sadržaja EP-aditiva je mala. Isto tako, tribološko svojstvo jednog maziva zavisi od režima rada sistema, ali i od kvaliteta obrade kontaktnih površina i uslova pod kojim je kontaktna površina nastala.



Slika 7.7. Primer promene triboloških karakteristika po fazama trošenja

## 7.2. Koroziija

Korozijom se naziva proces raspadanja metala pod dejstvom spoljne sredine. Ima više vrsta koroziije i različit je njihov uticaj na mehaničke karakteristike metala.



Slika 7.8. Koroziija prema izgledu korodiranog metala  
a – površinska; b – mestimična; c – tačkasta; d – međukristalna

Po načinu raspadanja metala, tj. prema izgledu korodiranog dela, razlikuju se sledeće vrste koroziije.<sup>[B.12]</sup>

- Površinska koroziija (Slika 7.8 a). Prema debljini produkta koroziije, skrame koja pokriva površinu metala, razlikuje se ravnomerna i neravnomerna površinska koroziija.

- Mestimična korozija (Slika 7.8 b) zahvata samo pojedine delove površine. Poseban vid mestimične korozije je tačkasta korozija (Slika 7.8 c).
- Međukristalna korozija (Slika 7.8 d). Korozioni procesi formiraju se po granicama metalnih zrna i razaraju veze između zrna.
- Selektivna korozija. Spada u grupu elektrohemijske korozije. Kao rezultat elektrohemijskih procesa razara se samo jedan element u leguri. Na ovaj način dolazi do gubitka cinka u mesingu, a kod livenih gvožđa raspada se Fe u prisustvu slobodnog ugljenika i cementita.  
U zavisnosti od procesa kojim nastaje, razlikuju se:<sup>[B.12]</sup>
  - hemijska korozija i
  - elektrohemijska korozija.

*Hemijska korozija* se javlja kao rezultat uzajamnog dejstva metala i korozivne sredine. Korozionu sredinu najčešće čine gasovi, neelektrolitne tečnosti i organska jedinjenja (nafta i njeni derivati). Produkti korozije često formiraju molekularnu skramu koja pokriva površinu metala.

Sa povećanjem debljine skrame opada moć difuzije atoma. Na ovaj način proces korozije se usporava, a kod nekih metala se i prekida. Kod aluminijuma, hroma i cinka stvorena opna štiti metal od dalje korozije.

Da bi opna štitila metal od dalje korozije, ona mora da bude kompaktna i neprozirna, otporna prema korozivnoj sredini i ne sme da puca u bilo kojim uslovima rada metalnog dela (dobra čvrstoća i plastičnost).

Brzina procesa hemijske korozije zavisi od sastava, strukture, naponskog stanja i kvaliteta obrade metala, od temperature i od sastava i vremena dejstva korozivne sredine.

Procesi u *elektrohemijskoj koroziji* slični su procesima u galvanskom elementu. U oba slučaja se hemijska energija pretvara u električnu. Za ovo je potrebno da se dva metala sa raznim elektrohemijskim potencijalima potope u neki elektrolit. Ovako nastala električna energija odvaja i odvodi atome slabijeg metala u rastvor. Kao elektroliti, najčešće se sreću voda i vodeni rastvori kiselina i soli. U ovakvim uslovima formiraju se mikro-galvanski elementi sa pokretnim jonima i sa strujnim kolom. Slabiji metal anodno odlazi u rastvor, a jači kao katoda biva zaštićen.

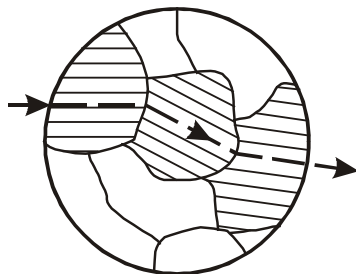
Najrasprostranjeniji vid elektrohemijske korozije jeste atmosferska korozija (korozija u vlažnom vazduhu na normalnoj temperaturi). U ovom slučaju, kao elektrolit služi vlaga iz vazduha koja se kondenzuje na površini predmeta. U kondenzatu se sreću  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , a u primorskim oblastima i jedinjenja hlora. Sva ta jedinjenja su anhidridi odgovarajućih kiselina. Brzina atmosferske korozije povećava se sa debljinom sloja kondenzata i sa sadržajem korozivnih gasova i vlage u vazduhu. Otuda se korozija brže razvija u zimskim, nego u letnjim mesecima, brže u industrijskim nego u seoskim područjima i brže u primorskim, nego u kontinentalnim krajevima.

### 7.3. Zamor

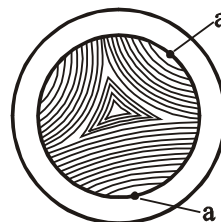
Zamor materijala počinje uvek na najopterećenijem mestu (gde se nalazi koncentracija napona) i u jednom metalnom zrnju.<sup>[B.12]</sup> Pod dejstvom promenljivog opterećenja, prve plastične deformacije (izražene u klizanju) pojavljuju se u jednom metalnom zrnju i to na mestu sa najvišim naponskim stanjem. Deformacijom ovo mesto ojačava i naponi se u njemu više ne povećavaju, dok se ne deformišu i ne ojačaju i ostali delovi metala u zrnju. Pri promenljivom opterećenju do ojačavanja (dinamičkog ojačavanja) dolazi pri znatno manjem naponu, nego pri statičkom opterećenju. Ojačavanje se javlja posle više promena opterećenja.

Sa završetkom procesa ojačavanja, metalno zrno praktično gubi sposobnost za dalju deformaciju. Tada naponi na najopterećenijem mestu opet počinju da se povećavaju, da bi brzo dostigli vrednost zatezne čvrstoće. Uskoro se javlja i prva mikropukotina. Pukotina deluje kao zarez i na svojim krajevima izaziva koncentraciju naprežanja. Ono brzo dostiže vrednost zatezne čvrstoće. Na ovaj način pukotina se širi, zahvatajući susedne deliće metala unutar napadnutog zrna. Mikropukotina prerasta u makropukotinu, da bi uskoro zahvatila celo metalno zrno. Spajanjem pukotina u susednim metalnim zrnima prelom se, usled zamora, širi od jednog do drugog zrna. Tako se prelom od zamora prostire kroz metalna zrna (transkristalni lom) – Slika 7.9.

U trenutku kada prelom od zamora zahvati toliki deo preseka da u preostalom delu i normalno opterećenje izaziva napone do vrednosti čvrstoće materijala, dolazi do preloma.



Slika 7.9. Transkristalni prelom od zamora



Slika 7.10. Prelom jedne kardanske osovine motornog vozila – mesta početka preloma

Otuda se na delu koji je prelomljen pod dejstvom promenljivog opterećenja uočavaju dve različite površine. Deo prelomljen zamorom izgleda glatko i mat je. Završni lom je rapaviji, krupnozrnastijeg je izgleda i sjajniji je.

Slika 7.10 prikazuje prelom kardanske osovine jednog motornog vozila. Zamor je približno istovremeno otpočeo na tri žarišta (a) i to na mestu prelaza iz tanjeg u deblji deo.

## 7.4. Definisanje promene stanja transportnih sredstava

Realizaciju zadate radne sposobnosti jednog tehničkog sistema obezbeđuje njegova struktura. Struktura se definiše grupisanjem elemenata u spregove, sklopove, agregate i sistem kao celinu.

Strukturu sistema, odnosno sklopa transportnog sredstva i njegovih elemenata, karakteriše:<sup>[B.7], [B.13]</sup>

- broj elemenata koji čine sistem,
- uzajamni raspored elemenata od kojih se sastoji sistem,
- vrsta, oblik i veličina elemenata,
- broj i način ostvarenja veze između elemenata,
- karakter uzajamnog delovanja pojedinih elemenata i sl.

Struktura može da se posmatra:

- makro – međusobni raspored agregata, sklopova i elemenata transportnog sredstva i
- mikro – međusobne veze pojedinih elemenata strukture.

Tokom rada transportnog sredstva makro struktura se po pravilu ne menja jer bi to menjalo celu koncepciju i konfiguraciju transportnog sredstva. Mikro struktura se, međutim, menja usled promene stanja. Struktura sklopa, elemenata ili celog transportnog sredstva zavisi od uzajamnog dejstva elemenata strukture, a određuje se **strukturnim parametrima**. To su veličine različite prirode: geometrijske (dužina, površina, zapremina), mehaničke (sila, pritisak, amplituda), akustične, električne, toplotne i druge.

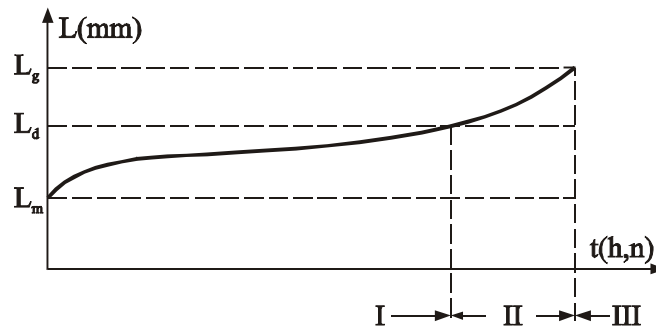
Veličina strukturnog parametra može da bude:

- **nominalna** (početna) – rezultat konstrukcije i izrade ( $L_M$ ) – obezbeđuje da radna funkcija sistema bude u području dozvoljenih odstupanja funkcije kriterijuma ili bar na granici ovog područja,
- **dozvoljena** (normativ) ( $L_d$ ) – odgovara radnoj funkciji sistema na granici područja dozvoljenih odstupanja funkcije kriterijuma,
- **granična** ( $L_g$ ) – odgovara stanju sistema na granici realizacije njegove radne funkcije.

Promena strukturnog parametra dovodi do promene funkcije radne sposobnosti, tj. do pogoršanja izlaznih karakteristika sklopa, agregata ili transportnog sredstva kao celine (Slika 7.11). Razlikuju se tri stanja sistema:

- **sistem je ispravan** – kada je strukturni parametar ispod dozvoljene vrednosti – radna funkcija sistema je u okviru područja dozvoljenog odstupanja (I područje, Slika 7.11),

- **sistem je u delimičnom otkazu (neispravan)** – strukturni parametar je između  $L_d$  i  $L_g$  – sistem radi sa smanjenom efikasnošću (II područje), i
- **sistem je u otkazu** – strukturni parametar je dostigao  $L_g$  – u sistemu se javio otkaz koji onemogućava dalje ispunjenje funkcije sistema (III područje).



Slika 7.11. Promena stanja sistema u funkciji promene strukturnog parametra

Prethodna razmatranja (vidi [B.8], [B.9] i [B.10]) dozvoljavaju da se zaključi da na intenzitet promene stanja delova, spregova i transportnih sredstava kao sistema utiču dve grupe faktora. Prva grupa se odnosi na samo transportno sredstvo, odnosno na kvalitet konstrukcije, izabrane materijale i kvalitet procesa proizvodnje. Drugu grupu čine faktori eksploatacije u koje ulaze uslovi rada (režim rada, opterećenje, putni, klimatski i topografski uslovi), kvalitet goriva i maziva, kvalitet održavanja i tehnika vožnje.

Stohastička priroda uticajnih faktora ima za rezultat stohastičnu promenu parametara stanja. Znači da će period rada određenog sprega do dostizanja granične vrednosti (kada spreg prelazi u stanje otkaza) biti stohastička veličina.

Period rada do otkaza meri se:

- kod transportnih vozila: pređenom kilometražom vozila ili/i brojem obrtaja motora,
- kod vozila u gradskom saobraćaju, vozila internog transporta, građevinske mehanizacije, poljoprivredne mehanizacije i sl.: brojem časova rada ili/i brojem obrtaja motora.

Otkazi se, zavisno od karaktera promene parametara stanja, dele na postepene i iznenadne:<sup>[B.14]</sup>

- **postepeni otkaz** – izlaz parametra stanja van granične oblasti izazvan njegovom postepenom promenom tokom rada ili čuvanja elementa (može se predskazati, tj. prognozirati),
- **iznenadni otkaz** – iznenadni izlaz parametra stanja van granične oblasti (ne može da se predvidi po promeni parametra u vremenu).



Ova činjenica ima poseban značaj kod određivanja koncepta održavanja. Kako je transportno sredstvo po svojoj prirodi popravljiv sistem, elementi u otkazu će, da bi spreg nastavio rad, biti zamenjeni ili opravljani.

Kod transportnih sredstava, kod kojih u principu nema rezervisanja elemenata<sup>3</sup>, otkaz ma kog bitnog elementa (element od čije ispravnosti zavisi ispunjenje funkcija posmatranog tehničkog sistema) ima za posledicu „kritični“ otkaz transportnog sredstva, a otkaz nebitnog elementa izaziva „nevažni“ otkaz transportnog sredstva (prema [B.15]). Praktičan značaj ove činjenice je u tome što, ako pri korišćenju transportnih sredstava, dođe do pojave nevažnog otkaza i ranije pomenutog delimičnog otkaza, transportno sredstvo može da nastavi obavljanje svog transportnog rada do planiranog povratka sa rada.

Znači, transportno sredstvo može određeni period svog rada da „nosi“ delimični i nevažni otkaz. Kritični otkaz uslovljava trenutni prekid rada transportnog sredstva i primenu mera održavanja (otklanjanje otkaza na mestu pojave, obično uz dolazak terenske ekipe za održavanje transportnih sredstava ili transport sredstva, obično uz pretovar, u bazu). Ova vrsta otkaza se često naziva *otkazom na liniji* (OL) i ima za posledicu značajne poremećaje u odvijanju transportnog procesa i značajne ekonomske posledice u poslovanju preduzeća.

Potrebno je istaći da se zakonitost određene pojave, koja je po prirodi stohastička, odnosi na grupu transportnih sredstava istog tipa koja rade u definisanim, približno istim uslovima eksploatacije (KE grupa). Svaka intervencija na transportnom sredstvu menja zakonitost promene parametara stanja određenog broja elemenata. Ovde je od posebnog značaja definisana koncepcija održavanja i kvalitet njenog sprovođenja jer utiče na zakonitost promene značajnog broja parametara stanja transportnog sredstva. Kvalitet rezervnog dela, kao i činjenica da se on često ugrađuje u sklop delova koji su već radili određen period vremena, značajno utiču na pomenutu zakonitost.

Analizu stanja transportnog sredstva kao celine posebno usložnjava i sve masovnija primena postupka agregatne zamene, kad je teško pratiti uticaj čestih izmena agregata.

Udesi, kao ekscesi tokom rada transportnog sredstva, dovode do trenutne intenzivne promene stanja većeg ili manjeg broja delova. Ovaj fenomen je u odnosu na moment delovanja, mesto i intenzitet, takođe stohastičan, jer zavisi od niza faktora slučajne prirode: uslova u kojima transportno sredstvo radi, sposobnosti i psihofizičkog stanja vozača, kao i od stanja transportnog sredstva. Udesi pri kojima dođe do otkaza bitnog dela uslovljavaju prekid rada transportnog sredstva (kritični otkaz na liniji usled udesa KOU), dok u ostalim slučajevima ono može da završi transportni zadatak (nevažni otkaz koji je posledica udesa – NOU). Po svojoj prirodi, zahtevi za otklanjanjem posledica udesa mogu da se opišu sa dva prosta procesa obnavljanja: kritični otkazi na liniji usled udesa, gde

---

<sup>3</sup> Izuzetak su pojedini elementi kočionog sistema

se ne ulazi u razmatranje da li je otkaz bitnog dela prouzrokovan udesom ili obrnuto, već razmatranje počinje od stanja neposredno posle udesa, i nevažni otkazi na liniji usled udesa.

Za analizu procesa promene stanja značajno je poznavanje momenta isključenja iz eksploatacije usled degradacije stanja transportnog sredstva, odnosno pojedinih njegovih agregata, posle čega sledi njihova generalna opravka (GO) ili njihov otpis. U principu, moment isključenja transportnog sredstva i određenih agregata iz eksploatacije planira se na osnovu tehnoekonomskih metoda. U slučaju potrebe obavljanja konkretnih intervencija većeg obima, posebno se za svaki konkretni slučaj ocenjuje potreba za GO.

Bitne karakteristike procesa promene stanja definišu se u zavisnosti od nivoa posmatranja konkretnog modela u kome se koriste. Na ovom mestu, pre svega, značajni su parametri procesa promene stanja od kojih zavisi proces održavanja.

U principu postoje tri osnovne grupe parametara, zavisno od toga koji vid procesa određuju:

1. *Parametri stanja transportnog sredstva.* Stanje transportnog sredstva je definisano velikim brojem strukturnih parametara. Izbor parametara zavisi od predmeta istraživanja. Poseban značaj imaju:
  - parametri stanja spregova od kojih zavisi bezbednost i osnovne funkcije transportnih sredstava,
  - funkcionalne veze između vrednosti parametara stanja i pređenog puta transportnog sredstva (rada sprega) i
  - varijacije vrednosti parametara stanja.
2. *Parametri pouzdanosti elemenata, sklopova, agregata i transportnih sredstava do pojave prvog otkaza su:*
  - gustina raspodele vremena do pojave otkaza –  $f(t)$ ,
  - funkcija pouzdanosti – verovatnoća bezotkaznog rada do momenta  $t$  –  $R(t)$ ,
  - srednje vreme bezotkaznog rada  $T_o$ ,
  - intenzitet otkaza  $\lambda(t)$  i dr.
3. *Parametri procesa obnavljanja* određuju se za elemente, sklopove, agregate i transportno sredstvo kao celinu određene KE grupe, takode u zavisnosti od predmeta istraživanja:
  - gustina raspodele vremenskih intervala između otkaza –  $f(T)$  (elementa, agregata,...),
  - parametar procesa obnavljanja u „periodu normalnog rada“ –  $\Lambda^4$  (svih elemenata, agregata,...); određuje se posebno za delimične i nevažne ot-

<sup>4</sup> U opštem slučaju  $\Lambda = f(t)$ , posebno u slučajevima gde se ne sprovode preventivne intervencije. Tada se, zavisno od zahtevanog nivoa tačnosti, može raditi sa srednjom vrednosti –  $\Lambda_{sr}$ .

kaze –  $A_N$  i za kritične otkaze čime je određena verovatnoća pojave otkaza na liniji –  $A_K$ ,

- parametar pojave nevažnih i kritičnih otkaza koji su posledica udesa svake KE grupe transportnih sredstava:  $A_{NOU}$ ,  $A_{KOU}$ , i dr.

Zavisnost procesa promene stanja od transportnog sredstva i uslova u kojima ono radi uslovljava definisanje sredstva i uslova u kojima transportno sredstvo radi:

- *Podaci koji definišu transportno sredstvo:*
  - garažni broj transportnog sredstva – omogućuje identifikovanje konkretnog transportnog sredstva,
  - tip i datum proizvodnje – definiše konstrukciju i namenu transportnog sredstva,
  - datum nabavke – definiše kalendarski početak perioda eksploatacije transportnog sredstva i moment obavljanja tehničkog pregleda (TP),
  - pređeni put /km/ (vreme rada, moto časovi) do momenta posmatranja i tokom posmatranja – određuje promenu stanja i moment obavljanja preventivnih intervencija prema utvrđenom programu,
  - momenti izvršenih izmena konkretnih agregata – definišu se u odnosu na pređeni put transportnog sredstva i vreme rada agregata.
- *Podaci koji određuju uslove u kojima transportno sredstvo radi:*
  - karakter prevoza (gradski prevoz ljudi, međugradski prevoz tereta i sl),
  - režim rada (brzine), opterećenje (putnik, tona), putni uslovi, klimatski uslovi, topografski uslovi, način vožnje,
  - definisani Program Preventivnih Intervencija (PPI) (vrsta, obim i periodičnost preventivnih intervencija) koji je sproveden i koji će se sprovoditi nad transportnim sredstvom,
  - kvalitet izvršenih tehničkih intervencija i ugrađenih rezervnih delova (RD) i materijala (zavisi od obučenosti radnika, raspoložive opreme i njenog stanja, kvaliteta upravljanja itd; teško se direktno meri, najčešće kontrolom uzoraka).

Stohastička priroda procesa, a u cilju postizanja dovoljne tačnosti, uslovljava minimalnu veličinu uzorka i dovoljno dug period praćenja.

