

Analiza eksperimentalno određenih koeficijenata trenja kotrljanja materijala triboelemenata

Vladimir Blanuša,
Visoka tehnička škola strukovnih studija
Novi Sad, Srbija
blanusa@vtsns.edu.rs,

Ivan Sovilj-Nikić, Bogdan Sovilj
Departman za proizvodno mašinstvo
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
bsovilj@uns.ac.rs,

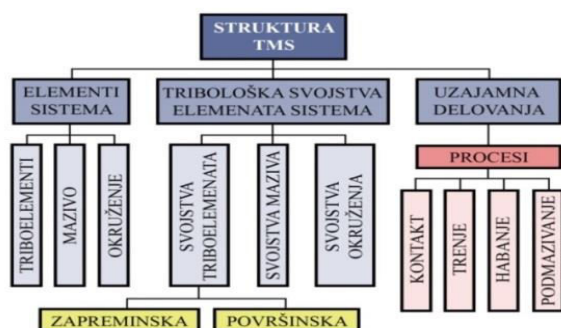
Sandra Sovilj-Nikić
Pedagoški fakultet
Univezitet u Novom Sadu
Sombor, Srbija
sandrasn@eunet.rs

Rezime— Savremena dostignuća nauke o materijalima pružaju širok asortiman materijala za izradu triboelemenata. U cilju dobijanja najpodesnijeg spajanja i optimalne kombinacije materijala triboparova neophodno je izvršiti detaljnu analizu svakog slučaja pojedinačno. U ovom radu prikazana je detaljna analiza rezultata eksperimentalnog istraživanja koeficijenata trenja kotrljanja materijala od kojih se najčešće izrađuju triboelementi tribomehaničkih sistema. Analiza dobijenih rezultata pokazuje da se najmanji koeficijent trenja kotrljanja ostvaruje kod tribološkog para tehnička plastika - polioksimetilen (POM) i aluminijum (Al).

Ključne reči: Tribologija; materijal, trenje kotrljanja; koeficijent trenja kotrljanja; triboelementi

I. UVOD

Materijali su izuzetno zastupljeni u svim sferama života. Radimo na materijalima i u materijalu. Pouzdane informacije o karakteristikama materijala triboelemenata su neophodne za tribološki ispravnu konstrukciju tribomehaničkog sistema. Svaki tribomehanički sistem poseduje određenu strukturu i izvršava određenu funkciju. Struktura sistema karakteriše njegovu unutrašnju organizaciju i sastav. Struktura predstavlja jednu od najvažnijih osobina sistema, a određena je elementima sistema, njihovim karakterističnim svojstvima i međusobnim delovanjima prilikom ostvarivanja osnovne funkcije sistema. Detaljan prikaz strukture tribomehaničkog sistema (TMS) dat je na slici 1 [1].



Slika 1. Struktura tribomehaničkog sistema

Funkcija koja predstavlja jednu od osnovnih karakteristika tribomehaničkih sistema može se izraziti kao odnos ulaznih i korisnih izlaznih veličina. Poremećaji utiču na procese trenja i habanja. Gubici u tribomehaničkim sistemima su izuzetno značajni sa aspekta kvalitetnog realizovanja elementarnih

funkcija. Tribološki procesi veoma su složeni procesi i oni zavise od velikog broja faktora.

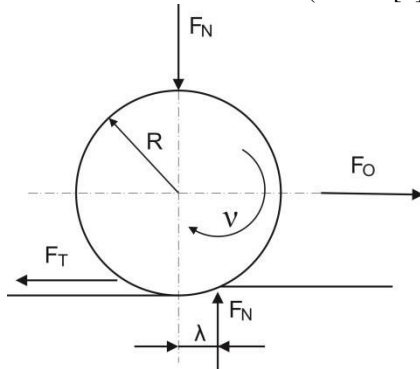
II. TRENJE KOTRLJANJA

Trenje kao proces suprotstavljanja kretanju triboelemenata sistema veoma utiče na mehanički stepen korisnog dejstva i predstavlja najvažniji parametar ocene sposobnosti tribomehaničkog sistema da očuva transportovanu energiju. Habanje kao oblik odnošenja materijala sa kontaktnih površina utiče na izmenu tehničkih parametara i promene u funkcionisanju tribomehaničkog sistema.

Trenje i habanje su osnovne tribološke karakteristike tribomehaničkih sistema. Oni su glavni uzrok izmene strukture tribomehaničkog sistema, gubitka energije i gubitka materijala. Veliki broj različitih faktora utiče na trenje i habanje kao na primer: struktura sistema, uslovi rada, mehaničko-hemijska svojstva materijala, karakteristike podmazivanja, agresivnost sredine, temperatura, topografija kontaktnih površina, prethodne i završne obrade površina kontakta i drugo [1]-[8].

Korišćenje standardnih mašinskih elemenata kao triboelemenata sa već razvijenim stepenom izučenosti i sistematizovanih informacija konstruktoru značajno olakšava analizu strukture sistema. Problem nastaje ukoliko se koriste triboelementi manje poznatih svojstava i složenih delovanja. Uticaj strukture na tribološke procese je veoma složen i često ga je teško definisati. Materijali triboelemenata imaju određena svojstva i karakteristike koji utiču na tribološke procese tribomehaničkih sistema. Izuzetno je značajno određivanje triboloških karakteristika postojećih materijala od kojih će se izrađivati triboelementi tribomehaničkih sistema [9,10]. Normiranim i standardizovanim laboratorijskim ispitivanjem uzorka iz poluproizvoda ili proizvoda dobija se najpotpuniji i najadekvatniji skup podataka o svojstvima materijala [11], [12]. Jedan od pokazatelja svojstava i karakteristika materijala je koeficijent trenja kotrljanja [1], [6], [7], [8], [13]. Trenje kotrljanja javlja se u tribomehaničkim sistemima različitih vrsta u kojima se jedan triboelement sistema kotrlja po drugom. U realnim tribomehaničkim sistemima oba čvrsta triboelementa su u većoj ili manjoj meri deformabilna. Pojava elastičnih i plastičnih deformacija u zoni kontakta pri kotrljanju jednog triboelementa po drugom uzrokuje i pojavu klizanja. Pojava klizanja u procesu

kotrljanja javlja se kao posledica prisustva tangencijalnih sila u tribomehaničkim sistemima ove vrste (slika 2 [6]).



Slika 2. Kotrljanje sa klizanjem

Na slici 2 moguće je uočiti delovanje tri momenta. To je moment otpora kotrljanju:

$$M_1 = F_N \cdot \lambda \quad (1)$$

Drugi moment je moment vučne sile:

$$M_2 = F_O \cdot R \quad (2)$$

Moment tangencijalne sile je treći moment:

$$M_3 = F_T \cdot R \quad (3)$$

Važi jednakost sva tri momenta, odnosno:

$$M = M_1 = M_2 = M_3 \quad (4)$$

Iz jednakosti momenata proizilaze izrazi za koeficijent trenja kotrljanja i koeficijent otpora kotrljanju:

$$F_T = \frac{\lambda}{R} \cdot F_N ; F_T = \mu_{KO} \cdot F_N \quad (5)$$

$$\mu_{KO} = \frac{\lambda}{R} ; \lambda = \mu_{KO} \cdot R \quad (6)$$

Gde je:

- M – moment
- F_N – spoljašnje opterećenje
- F_O – vučna sila
- F_T – tangencijalna sila
- R – poluprečnik valjka
- μ_{ko} – koeficijent trenja kotrljanja
- λ – koeficijent otpora kotrljanju

Trenje kotrljanja je manje od trenja klizanja i zbog toga se u tribološki ispravnoj konstrukciji tribomehaničkih sistema teži zameni trenja klizanja trenjem kotrljanja. Koeficijent trenja kotrljanja je veličina koja značajno zavisi od uparivanja materijala, kao i od brojnih drugih uticajnih faktora u koje se ubrajaju brzina kotrljanja, pritisak, trajanje kotrljanja, prisustnost sredstava za podmazivanje, temperatura, kvalitet površine i drugo.

III. MATERIJAL I METODE

Višedecenijska sistematska istraživanja triboloških procesa tribomehaničkih sistema obuhvatila su i istraživanje karakteristika materijala triboelemenata. Složeni procesi kontakta između triboelemenata uključuju i fizičku i hemijsku prirodu površina koje se nalaze u kontaktu, odnosno molekularnu međusobnu zavisnost materijala i kontaktnih sila. Procesni na triboelementima često imaju odlike prirodnih svojstava kao što su trenje, habanje, starenje, itd. Višedecenijska istraživanja su pomogla da se odredi značaj tribološkog projektovanja u kontekstu modernog projektovanja.

U ovom radu dat je deo rezultata istraživanja a koji se odnosi na analizu eksperimentalno određenih koeficijenata trenja kotrljanja materijala triboelemenata. Eksperimentalna istraživanja su urađena na osnovu prethodno utvrđenog plana koji je obuhvatio formiranje parova materijala od kojih se izrađuju triboelementi.

Prvi tribopar čine valjčić od čelika (50CrV4) prečnika 34 mm i podloga od aluminijuma (Al). U drugom triboparu uzorak je tehnička plastika - polioksimetilen (POM) koja se još naziva poliacetal ili acetal a podloga je od aluminijuma (Al). U trećem triboparu prvi triboelement je od čelika (15CrMo5) a podloga je ponovo od aluminijuma (Al). Prvi triboelement kod četvrtog tribopara je uzorak od sivog liva (GJL250) a drugi triboelement je podloga od aluminijuma (Al). Uređaj koji je korišćen za određivanje koeficijenata trenja kotrljanja materijala zasnovan je na metodi strme ravni [13]. Primenom ovog tribometra izvršeno je 30 merenja ugla kotrljanja za svaku od prethodno pomenutih kombinacija uzorak i podloga.

IV. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Dobijeni rezultati i odgovarajući koeficijenti trenja kotrljanja prikazani su u tabelama I, II, III i IV. Na slici 3 dat je grafički prikaz koeficijenata trenja kotrljanja za sve četiri kombinacije triboparova. Na slikama 4 i 5 histogramom su prikazani srednja vrednost i standardna devijacija koeficijenata trenja kotrljanja za četiri različita materijala uzorka u uslovima suvog kotrljanja pri čemu je u sva četiri slučaja kao podloga korišćen aluminijum (Al).

TABELA I. KOEFICIJENT TRENJA KOTRLJANJA TRIBOPARA ČELIK (50CRV4) I AL KAO PODLOGA

Broj merenja	Ugao kotrljanja		Koeficijent trenja kotrljanja
	α	tan α	
1.	0°36'	0,6000°	0,0105
2.	0°32'	0,5333°	0,0093
3.	0°33'	0,5500°	0,0096
4.	0°58'	0,9667°	0,0169
5.	0°48'	0,8000°	0,0140
6.	0°42'	0,7000°	0,0122
7.	0°31'	0,5167°	0,0090
8.	0°53'	0,8833°	0,0154
9.	0°41'	0,6833°	0,0119
10.	0°59'	0,9833°	0,0172
11.	0°54'	0,9000°	0,0157
12.	0°57'	0,9500°	0,0166
13.	0°46'	0,7667°	0,0134
14.	0°32'	0,5333°	0,0093
15.	0°34'	0,5667°	0,0099

16.	0°42'	0,7000°	0,0122
17.	0°45'	0,7500°	0,0131
18.	0°59'	0,9833°	0,0172
19.	0°45'	0,7500°	0,0131
20.	0°38'	0,6333°	0,0111
21.	0°46'	0,7667°	0,0134
22.	0°42'	0,7000°	0,0122
23.	0°35'	0,5833°	0,0102
24.	0°49'	0,8167°	0,0143
25.	0°52'	0,8667°	0,0151
26.	0°56'	0,9333°	0,0163
27.	0°44'	0,7333°	0,0128
28.	0°34'	0,5667°	0,0099
29.	0°57'	0,9500°	0,0166
30.	0°34'	0,5667°	0,0099
Srednja vrednost	0°44'28''	0,7411°	0,0129

TABELA II. KOEFICIJENT TRENJA KOTRLJANJA TRIBOPARA TEHNIČKA PLASTIKA (POM) I AL KAO PODLOGA

Broj merenja	Ugao kotrljanja		Koeficijent trenja kotrljanja
1.	0°16'	0,2667°	0,0047
2.	0°20'	0,3333°	0,0058
3.	0°24'	0,4000°	0,0070
4.	0°19'	0,3167°	0,0055
5.	0°27'	0,4500°	0,0079
6.	0°25'	0,4167°	0,0073
7.	0°28'	0,4667°	0,0082
8.	0°25'	0,4167°	0,0073
9.	0°25'	0,4167°	0,0073
10.	0°29'	0,4833°	0,0085
11.	0°27'	0,4500°	0,0079
12.	0°19'	0,3167°	0,0055
13.	0°23'	0,3833°	0,0067
14.	0°19'	0,3167°	0,0055
15.	0°34'	0,5667°	0,0099
16.	0°22'	0,3667°	0,0064
17.	0°35'	0,5833°	0,0102
18.	0°34'	0,5667°	0,0099
19.	0°21'	0,3500°	0,0061
20.	0°26'	0,4333°	0,0076
21.	0°16'	0,2667°	0,0047
22.	0°21'	0,3500°	0,0061
23.	0°16'	0,2667°	0,0047
24.	0°26'	0,4333°	0,0076
25.	0°23'	0,3833°	0,0067
26.	0°37'	0,6167°	0,0108
27.	0°34'	0,5667°	0,0099
28.	0°37'	0,6167°	0,0108
29.	0°17'	0,2833°	0,0050
30.	0°24'	0,4000°	0,0070
Srednja vrednost	0°24'58''	0,4161°	0,0072

TABELA III. KOEFICIJENT TRENJA KOTRLJANJA TRIBOPARA ČELIK (15CRMO5) I AL KAO PODLOGA

Broj merenja	Ugao kotrljanja		Koeficijent trenja kotrljanja
1.	1°23'	1,3833°	0,0242
2.	1°04'	1,0667°	0,0186

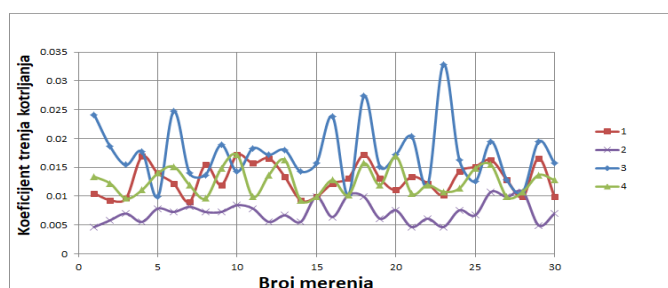
3.	0°53'	0,8833°	0,0154
4.	1°01'	1,0167°	0,0178
5.	0°34'	0,5667°	0,0099
6.	1°25'	1,4167°	0,0247
7.	0°48'	0,8000°	0,0140
8.	0°47'	0,7833°	0,0137
9.	1°05'	1,0833°	0,0189
10.	0°49'	0,8167°	0,0143
11.	1°03'	1,0500°	0,0183
12.	0°59'	0,9833°	0,0172
13.	1°02'	1,0333°	0,0180
14.	0°49'	0,8167°	0,0143
15.	0°54'	0,9000°	0,0157
16.	1°22'	1,3667°	0,0239
17.	0°35'	0,5833°	0,0102
18.	1°34'	1,5667°	0,0274
19.	0°52'	0,8667°	0,0151
20.	0°59'	0,9833°	0,0172
21.	1°10'	1,1667°	0,0204
22.	0°41'	0,6833°	0,0119
23.	1°06'	1,8833°	0,0329
24.	0°56'	0,9333°	0,0163
25.	0°43'	0,7167°	0,0125
26.	1°07'	1,1167°	0,0195
27.	0°44'	0,7333°	0,0127
28.	0°37'	0,6167°	0,0108
29.	1°07'	1,1167°	0,0195
30.	0°54'	0,9000°	0,0157
Srednja vrednost	0°59'40''	0,994475°	0,0174

TABELA IV. KOEFICIJENT TRENJA KOTRLJANJA TRIBOPARA SIVI LIV (GJL250) I AL KAO PODLOGA

Broj merenja	Ugao kotrljanja		Koeficijent trenja kotrljanja
1.	0°46'	0,7667°	0,0134
2.	0°42'	0,7000°	0,0122
3.	0°33'	0,5500°	0,0095
4.	0°38'	0,6333°	0,0111
5.	0°48'	0,8000°	0,0140
6.	0°52'	0,8667°	0,0151
7.	0°41'	0,6833°	0,0119
8.	0°33'	0,5500°	0,0095
9.	0°51'	0,8500°	0,0148
10.	0°59'	0,9833°	0,0172
11.	0°34'	0,5667°	0,0099
12.	0°47'	0,7833°	0,0137
13.	0°56'	0,9333°	0,0163
14.	0°32'	0,5333°	0,0093
15.	0°34'	0,5667°	0,0099
16.	0°44'	0,7333°	0,0127
17.	0°35'	0,5833°	0,0102
18.	0°54'	0,9000°	0,0157
19.	0°41'	0,6833°	0,0119
20.	0°58'	0,9667°	0,0169
21.	0°36'	0,6000°	0,01045
22.	0°41'	0,6833°	0,0119
23.	0°37'	0,6167°	0,0108
24.	0°39'	0,6500°	0,0113
25.	0°51'	0,8500°	0,0148
26.	0°53'	0,8833°	0,0154

27.	0°34'	0,5667°	0,0099
28.	0°37'	0,6167°	0,0108
29.	0°47'	0,7833°	0,0137
30.	0°44'	0,7333°	0,0128
Srednja vrednost	0°43' 12"	0,7200°	0,0125

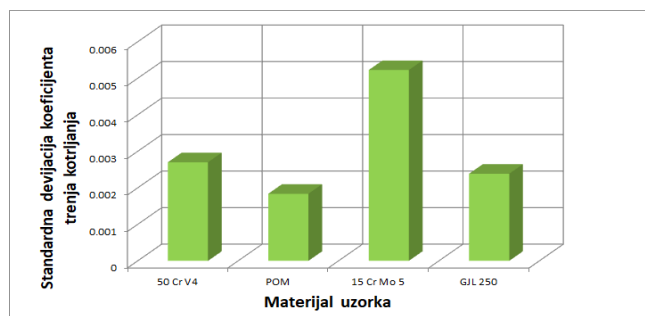
Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da je srednja vrednost koeficijenta trenja kotrljanja najmanja za tribološki par POM (uzorak) i Al (podloga). Najveću srednju vrednost koeficijenta trenja kotrljanja ima tribološki par 15CrMo5 (uzorak) i Al (podloga). Tribološki parovi 50CrV4 (uzorak) i Al (podloga) i GJL260 (uzorak) i Al (podloga) imaju približno istu srednju vrednost koeficijenta trenja klizanja [10] i srednju vrednost trenja kotrljanja za četiri ista tribološka para.



Slika 3. Koeficijent trenja kotrljanja za triboparove
1. 50CrV4-Al, 2. POM-Al, 3. 15CrMo5-Al, 4. GJL250-Al



Slika 4. Srednja vrednost koeficijenta trenja kotrljanja za triboparove
1. 50CrV4-Al, 2. POM-Al, 3. 15CrMo5-Al, 4. GJL250-Al



Slika 5. Standardna devijacija koeficijenta trenja kotrljanja za triboparove
1. 50CrV4-Al, 2. POM-Al, 3. 15CrMo5-Al, 4. GJL250-Al

Za tribološki par 50CrV4 (uzorak) i Al (podloga) koeficijent trenja klizanja je 20,8 puta veći nego koeficijent trenja kotrljanja. Koeficijent trenja klizanja za tribološki par POM (uzorak) i Al (podloga) je 32,2 puta veći nego koeficijent trenja kotrljanja. Za tribološki par 15CrMo5 (uzorak) i Al (podloga) koeficijent trenja klizanja je 13,7 puta veći nego koeficijent trenja kotrljanja. Koeficijent trenja klizanja za tribološki par GJL250 (uzorak) i Al (podloga) je 11,8 puta veći nego koeficijent trenja kotrljanja.

TABELA V. SREDNJA VREDNOST KOEFICIJENTA TRENJA KLIZANJA I KOTRLJANJA

UZORAK	PODLOGA	KOEFICIJENT TRENJA KLIZANJA	KOEFICIJENT TRENJA KOTRLJANJA
50CrV4	Al	0,2682	0,0129
POM	Al	0,2347	0,0073
15CrMo5	Al	0,2383	0,0174
GJL250	Al	0,1484	0,0126

Na osnovu analize dobijenih rezultata ispitivanja koeficijenta trenja klizanja u radu [10] i koeficijenta trenja kotrljanja u ovom radu može se zaljučiti da su koeficijenti trenja klizanja višestruko veći od koeficijenta trenja kotrljanja, pa se stoga i u praksi gde god je to moguće trenje klizanja između triboparova zamenjuje trenjem kotrljanja.

V. ZAKLJUČAK

Za izradu triboparova tribomehaničkih sistema koriste se materijali različitih tvrdoća.

Najpotpuniji i najadekvatniji skup podataka o svojstvima materijala triboelemenata dobija se normiranim i standardnim laboratorijskim ispitivanjima tribo parova (uzorak-podloga).

Na osnovu ispitivanja trenja kotrljanja za četiri različita tribopara primenom tribometra najmanji koeficijent trenjakotrljanja u uslovima suvog kotrljanja dobijen je za tribopar (uzorak-podloga) izrađen od materijala POM (tehnička plastika) i Al.

LITERATURA

- [1] S. Tanasijević, "Tribološki ispravno konstruisanje", Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2004.
- [2] M. Kandeveva-Ivanova, D. Karastoyanov, B. Ivanova, E. Assenova, "Tribological Interactions of Spheroidal Graphite Cast Iron Microalloyed by Tin", Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria, 2016.
- [3] I. Sovilj-Nikić, "Primena genetskog algoritma u optimizaciji geometrijskih parametara odvalnog glodala", Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Serbia, Master Thesis, 2007.
- [4] I. Sovilj-Nikić, "Modelovanje i optimizacija procesa odvalnog glodanja", Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Serbia, Doctoral Thesis (unpublished)
- [5] B. Sovilj, S. Sovilj-Nikić, "Tribological researches of gear cutting processes of cylindrical gears", invited paper in Proc. of 13th International Scientific Conference MMA 2018, Novi Sad, Serbia, 2018.
- [6] B. Ivković, A. Rac, "Tribology (Tribologija)", Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, Serbia, 1995.
- [7] M. Babić, Monitoring ulja za podmazivanje, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 2004.

- [8] S. Pehan, J. Flašker, "Tribologija", Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2008.
- [9] B. Sovilj, D. Ješić, I. Sovilj-Nikić, „Identifikacija i metode merenja triboloških karakteristika materijala“, Savremena poljoprivredana tehnika, Vol. 36. No3, pp.295-305, 2010, ISSN 0350-2953
- [10] V. Blanuša, I. Sovilj-Nikić, B. Sovilj, S. Sovilj-Nikić, Dušan Gavanski, "Analiza eksperimentalno određenih koeficijenata trenja klizanja materijala triboelemenata", 21th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, pp. 103-108, 2022.
- [11] T. Filetin, M. Franz, Đ. Španiček, V. Ivušić, "Svojstva i karakteristike materijala, Sveučilište u Zagrebu", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Croatia, 2012.
- [12] B. Sovilj, S. Sovilj-Nikić, G. Varga, V. Blanuša, "Analysis of the possibility of improving the characteristics of hob milling tools for gear cutting of cylindrical gears", Proceedings of International Scientific Conference KOD, pp.1-6, Novi Sad, Serbia, 2018.
- [13] Tadić, B., Jeremić, B., Mitrović, S., Erić, M., "Development of Tribometer and Measurement Results of Static Coefficient of Friction Sliding and Coefficient of Rolling Friction by Principle Steep Plane", in Proc. of 12th International Conference on Tribology SERBIATRIB'11, Kragujevac, Serbia, pp. 397-402, 2011.

ABSTRACT

Modern achievements of materials science provide a wide range of materials for the production of triboelements. In order to obtain the most suitable connection and optimal combination of tribocouple materials, it is necessary to carry out a detailed analysis of each case individually. This paper presents a detailed analysis of the results of experimental research on the coefficients of rolling friction of materials from which the triboelements of tribomechanical systems are most often made. The analysis of the obtained results shows that the lowest coefficient of rolling friction is achieved with the tribological pair of plastic (POM) and aluminum (Al).

ANALYSIS OF EXPERIMENTALLY DETERMINED ROLLING FRICTION COEFFICIENTS OF TRIBOELEMENT MATERIALS

Vladimir Blanuša, Ivan Sovilj Nikić, Sandra Sovilj Nikić i Bogdan Sovilj