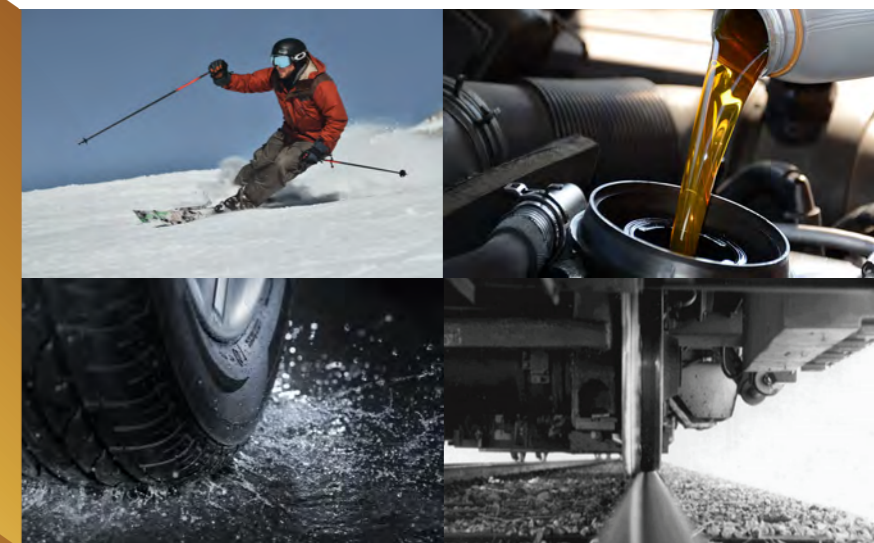
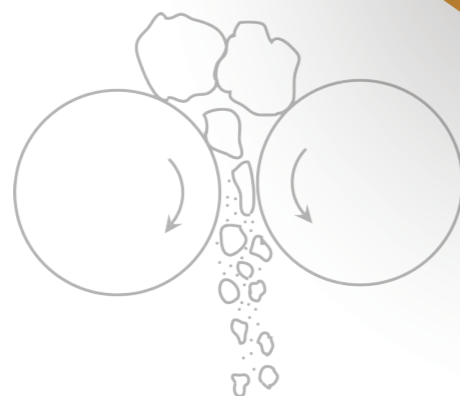
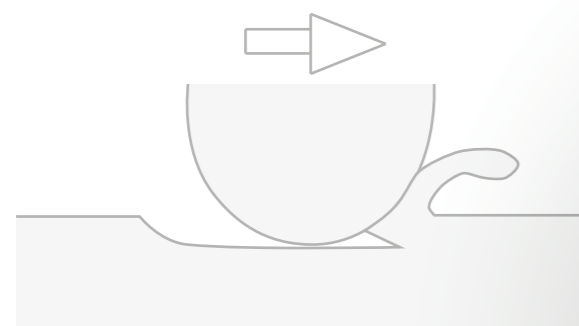
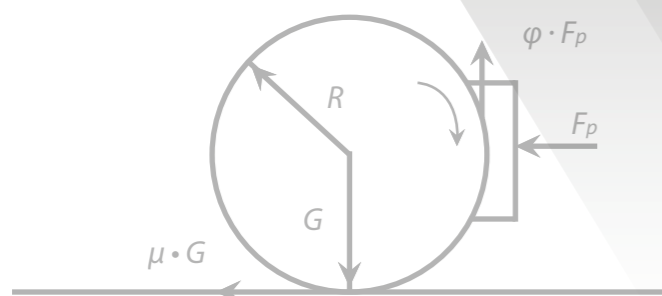


# ТРИБОЛОГИЈА

## ТРИБОЛОГИЈА





УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



Душан Стаменковић, Милан Банић, Милан Николић

# ТРИБОЛОГИЈА

НИШ, 2020.

**Проф. др Душан Стаменковић**  
**Доц. др Милан Банић**  
**Милан Николић**

## **ТРИБОЛОГИЈА**

### **Рецензенти:**

Проф. др Александар Венцл  
*Машински факултет Београд*  
Проф. др Слободан Митровић  
*Факултет инжењерских наука Крагујевац*

### **Лектор:**

Љиљана Пањковић

### **Штампање одобрило:**

Наставно-научно веће  
Машинског факултета  
Универзитета у Нишу

### **Издавач:**

Машински факултет  
Универзитета у Нишу

### **За издавача:**

Проф. др Ненад Павловић, декан

**Тираж:** 200 примерака

### **Компјутерска обрада текста:**

др Милан Банић

### **Корице:**

Ивана Николић

### **Штампа:**

ГРАФИКА ГАЛЕБ - НИШ

### **СТАМЕНКОВИЋ, Душан, 1956-**

Трибологија / Душан Стаменковић,  
Милан Банић, Милан Николић. - Ниш :  
Машински факултет Универзитета, 2020  
(Ниш : Графика Галеб). - 142 стр. :  
илустр. ; 25 cm

Тираж 200. - Библиографија: стр. 137-142.  
- Садржи и: Речник стручних израза /  
Бранко Ивковић, Речник триболошких  
термина.

ISBN 978-86-6055-136-0

1. Банић, Милан, 1978- [аутор] 2.  
Николић, Милан, 1978- [аутор]  
а) Трибологија б) Трење

COBISS.SR-ID 24479497



Прештампавање и умножавање није дозвољено

## ПРЕДГОВОР

Трибологија је наука о контактном дејству чврстих тела при њиховом релативном кретању, која обухвата трење, хабање и подмазивање. Трибологија, као наука и технологија, укључује различите научне дисциплине као што су конструисање, одржавање машинских система, подмазивање, механика контакта, механика флуида, наука о материјалима, као и физика, хемија и инжењерство у општем смислу речи. У многим ситуацијама трење је непожељна појава коју би требало свести на минимум, јер омета кретање, ствара губитке енергије, ствара нежељену топлоту и изазива хабање и оштећење контактних површина. За повећање енергетске ефикасности техничких уређаја неопходно је побољшање триболошких карактеристика, односно смањење губитака изазваних трењем и хабањем.

Трибологија је научна дисциплина која се не односи само на индустрију, већ и на свакодневни живот. Трење је феномен који постоји у многим појавама око нас, као што су ходање/трчање/скакање, кретање возила у саобраћају, индустријска производња (машинска обрада), чишћење кућних подова, прање руку, и друго. Трење настаје у ситуацији када су тела у међусобном контакту, под одређеним додирним притиском и када постоји релативно кретање једног тела у односу на друго. Трење је, дакле, појава која се редовно дешава у свакодневном животу и, у основи, представља отпор кретању тела. Безбедност у саобраћају, у највећој мери, зависи од трења у кочном систему возила и трења у контакту пнеуматик-коловоз. Међусобно трљање дланова како би загрејали руке зими сви знамо као пример примене трења. Шкрипање шарки на вратима, нам није пријатно за слушање, па треба да подмажемо шарке да би смањили трење тј. шкрипање. Зглобови, као што су колено, кук, раме и др. су примери фриксионих елемената, у машинству познати као лежаји.

Ова књига је настала као резултат вишегодишњег искуства аутора у настави на предмету Трибологија, као и на искуству у експерименталним истраживањима. Основни циљ књиге је да се систематизују информације из области трибологије које могу да користе инжењерима у пракси, у индустријским процесима, конструкцији и одржавању возила, уређаја и постројења и сл. Инжењери, а посебно конструктори машинских система, треба да користе расположива средства/методе да редукују трење и хабање избором одговарајућих услова ослањања и избором одговарајућих материјала и мазива за конкретне контактне површине. Међутим, у одређеним случајевима потребно је обезбедити повећану силу трења (кочнице, пресовани спојеви, фриксиони преносници,

и др.) што инжењери треба да обезбеде адекватним мерама. Ова књига пружа и основне информације о биотрибологији где машински инжењери имају значајно учешће.

У првом поглављу књиге су описане основне триболошке величине и објашњена је разлика између статичког и кинетичког трења. Услови међусобног контакта чврстих тела и величина реалне површине контакта су од пресудног утицаја на силу и коефицијент трења. У другом поглављу се описује спољашње трење чврстих тела и у оквиру тога дат је преглед основних теорија о трењу, описани су параметри који утичу на трење, као и појаве које настају при трењу. Сила трења, хабање контактних површина и ослобађање топлоте, електричне енергије и других видова енергије у току трења су у ствари међусобно узрочно-последично повезане појаве које су увек присутне при спољашњем трењу чврстих тела, посебно метала.

У трећем и четвртном поглављу су описани хабање и подмазивање који представљају важне области трибологије за инжењерску праксу.

У петом поглављу је дат приказ триболошких аспеката железничких возила. Имајући у виду конструкцијску сложеност и начин остваривања кретања железничких возила, може се закључити да триболошке појаве код возила у покрету егзистирају практично свуда - њих има почевши од контакта точка са шинама, преко оних које настају на додиру спољашњих површина возила са ваздушном масом која их окружује, па до контакта пантографа са електричним водом, укључујући и све оне које се дешавају унутар појединих подскопова и скопова самих возила.

У шестом поглављу је обрађено трење у контакту вискоеластичних и чврстих тела у оквиру кога су описани вискоеластични модели материјала и механизми трења вискоеластичних тела по чврстој подлози. Као примери ових контаката описани су трење између обуће и подлоге и трење између пнеуматика и коловоза.

Један од веома важних и хуманих аспеката трибологије, којим се у последње време бави велики број истраживача, јесте биотрибологија у оквиру које се истражују проблеми трења, хабања и подмазивања у људском организму. На основу начина функционисања зглобова уочава се велика сличност са функционисањем лежишта у машинама. Поред тога, у седмом поглављу књиге, дат је кратак опис трибологије коже и ока.

Ова књига, поред осталог, има за циљ да опише основне концепције и методе лабораторијског испитивања и анализе, као и да укаже на основе дијагнозе триболошких проблема у експлоатационим условима. С обзиром на то, у осмом поглављу је извршена анализа бројних триболошких параметара и указано на то да је у спровођењу лабораторијских испитивања/мерања потребно обезбедити триболошке параметре који егзистирају у експлоатационим условима и наведени су примери мерења која су извршена у лабораторијама Машинског факултета у Нишу.

На крају књиге дат је речник стручних израза (српско-енглески) који се односи на област трибологије, који је преузет из књиге „Речник триболошких термина ” проф. др Бранка Ивковића.

Аутори изражавају захвалност рецензентима ове књиге др Александру Венцу, редовном професору Машинског факултета Универзитета у Београду и др Слободану

Митровићу, редовном професору Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу на изузетно корисним сугестијама.

Посебан утицај на припрему ове књиге извршили су професор др Бранко Ивковић (1931-2016) и професор др Мирослав Ђурђановић (1940-2019) који су пуно цитирани у овој књизи. Они су пре 30 година аутора ове књиге Душана Стаменковића „увели” у област трибологије. Професор др Мирослав Ђурђановић је први наставник на предмету Трибологија који је уведен у наставу 2001. године, и у припреми ове књиге дао је подршку да се садржај предмета прошири на област трења вискоеластичних тела и биотрибологије

Надамо се да ће ова књига бити корисна читаоцима.

Свесни чињенице да су грешке у раду могуће, са циљем да наредна издања књиге буду квалитетнија, све добронамерне примедбе и сугестије читалаца ове књиге су добродошле.

У Нишу, октобар 2020. године

Аутори

# САДРЖАЈ

1. ОСНОВИ ТРИБОЛОГИЈЕ .....	1
1.1. Историја трибологије .....	1
1.2. Међусобни контакт чврстих тела .....	6
1.2.1. Површина чврстих тела.....	6
1.2.2. Додир површина чврстих тела.....	13
1.2.3. Одређивање контурне и стварне површине додира .....	15
1.2.4. Одређивање реалног притиска .....	16
1.3. Сила и коефицијент трења .....	19
1.4. Статичко и кинетичко трење .....	21
2. ТРЕЊЕ У КОНТАКТУ ЧВРСТИХ ТЕЛА .....	23
2.1. Основне теорије о трењу чврстих тела .....	23
2.1.1. Молекуларна теорија трења.....	24
2.1.2. Адхезиона теорија трења .....	25
2.1.3. Енергетска теорија.....	27
2.1.4. Молекуларно механичка теорија.....	29
2.2. Међусобно дејство тела и појаве при трењу .....	33
2.2.1. Генерисање топлоте при трењу .....	34
2.2.2. Трење и електричне појаве .....	41
2.3. Параметри који утичу на трење.....	43
2.3.1. Утицај структуре метала .....	43
2.3.2. Утицај нормалног оптерећења.....	44
2.3.3. Утицај брзине клизања .....	45
2.3.4. Утицај температуре .....	46
2.3.5. Утицај величине површине додира и броја њених компонената.....	46
2.3.6. Утицај храпавости контактних површина.....	47
2.3.7. Утицај осталих параметара .....	48
3. ХАБАЊЕ.....	50
3.1. Адхезивно хабање.....	53
3.2. Абразивно хабање .....	55
3.3. Заморно хабање.....	58
3.4. Трибохемијско хабање .....	59

3.5. Утицајни параметри.....	60
3.6. Селективни трансфер масе.....	61
4. ПОДМАЗИВАЊЕ .....	65
4.1. Средства за подмазивање .....	65
4.2. Класификација подмазивања .....	67
4.2.1. Непотпуно подмазивање .....	69
4.2.2. Потпуно подмазивање .....	70
5. ТРИБОЛОШКИ АСПЕКТИ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА.....	75
5.1. Екстерно триболошко подручје.....	75
5.2. Интерно триболошко подручје.....	77
5.3. Контакт точак – шина.....	79
5.3.1. Погонска сила – сила на ободу точка.....	80
5.3.2. Сила кочења.....	81
5.3.3. Хабање точка и шине.....	84
5.4. Пресовани спојеви .....	85
5.4.1. Пресовани спојеви у погонским склоповима железничких возила .....	85
5.4.2. Уздужно и попречно пресовани спојеви .....	87
5.4.3. Прорачун носивости пресованих спојева.....	88
5.4.4. Стик-слип кретање.....	90
6. ТРЕЊЕ У КОНТАКТУ ВИСКООЛЕАСТИЧНИХ И ЧВРСТИХ ТЕЛА.....	93
6.1. Вискоеластични модели материјала .....	93
6.2. Механизам трења вискоеластичних тела по чврстој подлози.....	95
6.2.1. Адхезија .....	96
6.2.2. Деформација гуме и вискоеластичност .....	97
6.2.3. Кидање и хабање.....	99
6.3. Трење између обуће и подлоге .....	99
6.4. Трење између пнеуматика и коловоза .....	101
6.4.1. Латерална сила .....	102
6.4.2. Лонгитудинална сила .....	103
6.4.3. Утицајни параметри.....	104
6.4.4. Брзина клизања .....	105
7. БИОТРИБОЛОГИЈА .....	107
7.1. Биомеханика и трибологија људског хода .....	108

7.2. Трење у зглобовима .....	111
7.3. Трибологија коже.....	114
7.4. Трење у оку.....	116
8. ТРИБОЛОШКА МЕРЕЊА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА .....	117
8.1. Триболошки параметри.....	117
8.2. Трибометри.....	119
8.3. Основни принципи мерења отпорности на клизање обуће и пода .....	122
8.4. Лабораторијско испитивање коефицијента трења између обуће и пода.....	125
8.4.1. Основне поставке експерименталног утврђивања коефицијента трења .....	125
8.4.2. Опис мерног места и анализа експерименталних резултата .....	126
8.5. Лабораторијско испитивање коефицијента трења људске коже.....	128
8.6. Процена вредности коефицијента трења код контакта вискоеластичних и чврстих тела применом нумеричких симулација.....	129
9. РЕЧНИК СТРУЧНИХ ИЗРАЗА .....	132
ЛИТЕРАТУРА.....	137