

СИЛА ТРЕЊА

- од фундаменталних процеса до макроскопских закона

Љубиша Нешић, ПМФ у Нишу и Одељење за ученике са посебним способностима за физику у Гимназији "Светозар Марковић"

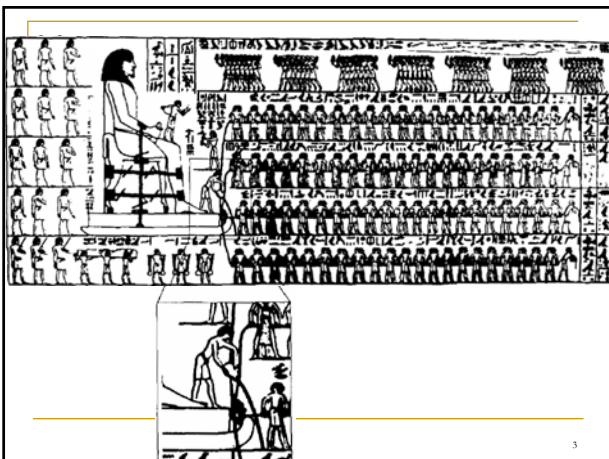
У сарадњи са Вером Прокић,
Пољопривредна школа Приштина-Лешак

1

Скица

- 1. Увод
- 2. Традиционални приступ обради трења у школи
- 3. Историјски развој представа о трењу
 - ...
 - 20. век
- 4. Трење и хабање и дисипација енергије
- 5. Адхезија
- 6. Микроскопија атомских сила
- 7. Stick-slip модел трења
- Закључак

2



3

1. Увод

- Области у којима је значајно:
 - Индустрија
 - Транспорт
 - стоматологија
 - Козметика
- Амбивалентан однос према трењу
 - Некада је пожељно (гуме и пут, брушење, полирање, пескарење)
 - Некада не (хабање)
- Научно усавршавање, ...

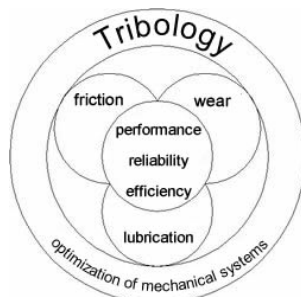
4

1. Увод

- Мултидисциплинаран приступ – наука и инжењерство
- 2. половина 20. века – настанак трибологије
 - 1966. године уведен појам (Питер Јост)
- Трибологија <-> трење
 - Трибологија – уз трење се бави и хабањем и подмазивањем
 - Трибологија –Индустрија

5

1. Увод



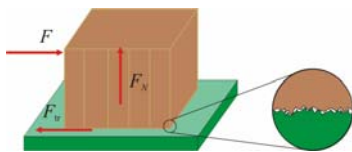
6

1. Увод

- Конструисани осетљиви уређаји за мерење сила на местима контакта
- Трибологија
 - Макротрибологија
 - Микротрибологија
 - нанотрибологија

7

2. Традиционални приступ обради трења у школи



- Једно тело је “горње” и оно притиска “доње”

$$F_{tr} = \mu F_N$$

8

2. Традиционални приступ обради трења у школи

- Једно тело се обично сматра “горњим” и оно притиска “доње”
- Сила трења је

$$F_{tr} = \mu F_N$$

- Коефицијент трења за дати пар материјала има обично две вредности
 - Статичка
 - Кинетичка/динамичка

9

Sistem	μ_s	μ_k
Čelik i suvi čelik	0,6	0,3
Čelik i nauljeni čelik	0,05	0,03
Drvo i drvo	0,25-0,5	0,2-0,3
Teflon i čelik	0,04	0,04
Staklo i staklo	0,94	0,4
Guma i asfalt	1,0	0,8
Voskareno drvo i vlažan sneg	0,14	0,1
Voskareno drvo i suv sneg	-	0,04
Led i led	0,1	0,03
Čelik i led	0,4	0,02

10

2. Традиционални приступ обради трења у школи – границе применљивости

- Трења има и када тела стоје вертикално!
 - Лепак! - адхезија
- Има "необичних" материјала [Ugo Besson, Lidia Borghi, Anna De Ambrosi and Paolo Mascheretti, How to teach friction: Experiments and models, *Am. J. Phys.* **75** (12), 1106-1113 (2007)]

$$F_{tr} \propto F_N^k, \quad k < 1$$

- Погрешне представе ученика о трењу могу да буду изазване непотпуним разумевањем аутора уџбеника
 - Точкови и ваљци не "раде" на истом принципу нпр. (у књигама се овоме не поклања скоро никаква пажња)
 - Потенцијални предмет истраживања у настави

11

Мали отклон

- Ваљак vs точак

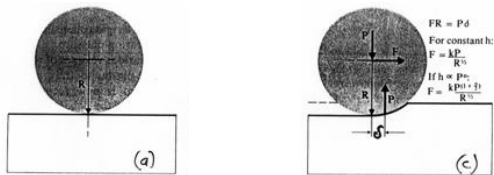
12

Трење котрљања

- када подмећемо ваљке показује се да је за покретање терета на њима довољна сасвим мала сила.
- При проклизавању је међутим потребна сила
- Са ваљцима свака, ма како мала сила изазива кретање јер НЕМА ПРОКЛИЗАВАЊА, нити релативног кретања (померања) једне површи преко друге.
- **Сила трења према томе не врши рад.**
- **У суштини ваљак замењује трење клизања трењем котрљања које је много мање од трења клизања.**

13

- Трење котрљања – када се може занемарити?



14

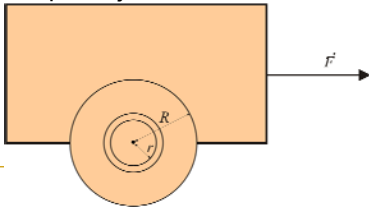
Точак и трење

- дрвени диск “натакнут” на осу – око 4. века пре нове ере на истоку.
- У 2. веку је унапређен додавањем паока, главчине и заобљених ивица
- најважније је уочити да се при “премештању” предмета који има тачкове **не замењује сила трења клизања силом трења котрљања** (то се дешавало при подметању ваљака под предмет) – **(честа непрецизност у књигама)**
- трење остаје, али је пренето у осу тачка, односно одговарајућа лежишта

15

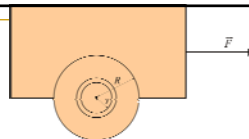
Принцип функционисања точка

- најједноставније разумети на основу енергијских разматрања
- дрвени квадар са осом полупречника r . На оси се налазе дрвени точкови полупречника R .
- Рад силе трења је $A' = A r/R$



16

Принцип функционисања точка



- Дакле точак не умањује силу трења (њену вредност)!!!
- Међутим - ...
- рад против те силе је много мањи него при клизању.

17

3. Историјски развој представа о трењу

- Аристотел (4. век п.н.е.)
 - Да би тело клизило униформно потребно је стално деловати на њега
- Леонардо да Винчи (15. век)
 - Увео појам *трење, хабање, подмазивање*
 - Мерио угао стрме равни при коме тело почиње да клизи
 - Увео коефицијент трења клизања *као однос силе трења и масе тела*
 - Није публиковао закључке

18

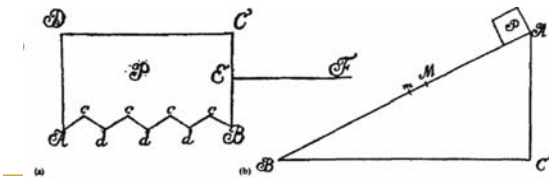
3. Историјски развој представа о трењу

- Аристотел (4. век п.н.е.)
- Леонардо да Винчи (15. век)
- Амонтон (1699.)
 - **Сила трења је директно пропорционална нормалној сили којом тело притиска подлогу**
 - **Интензитет силе трења не зависи од величине додирне површине**
- Леонард Ојлер (1707-1783)

19

3. Историјски развој представа о трењу

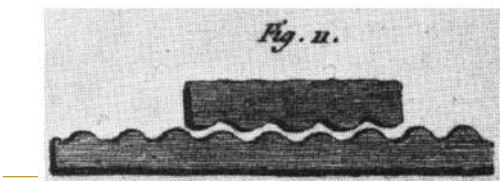
- Леонард Ојлер (1707-1783)
 - Моделирао неравнине као троугласте
 - Кретање/клизање почиње када нагиб неравнина постане хоризонталан
 - Увео је ознаку за коефицијент трења словом μ



20

3. Историјски развој представа о трењу

- Шарл-Огистен де Кулон (1736-1806) – трећи закон трења
 - **Од момента проклизавања сила трења је независна од релативне брзине клизања**



21

3. Историјски развој представа о трењу

■ Закони:

- Кулон - Амонтонови
- Да Винчи – Кулон - Амонтонови
- Кулонови
- Суво трење клизања - Кулоново трење

22

3. Историјски развој представа о трењу

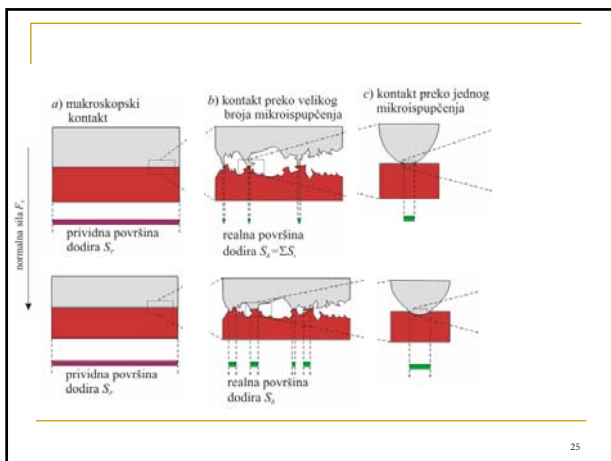
- Узроци
- Ојлер – троугласте неравнине
- Кулон – микронеравнине
- Десагулије (1734) – молекуларна адхезија
- Семјуел Винце (1785) – кохезија и адхезија
- Џон Лесли (крај 18. века) – анализирао енергијске аспекте
 - Закључак - не може се објаснити геометријским неравнинама
 - Колико енергије се изуби при "пењању" толико се надокнади при "спуштању"
- Индустриска револуција
- Друга половина 19. века Хајнрих Херц - на основу теорије еластичности

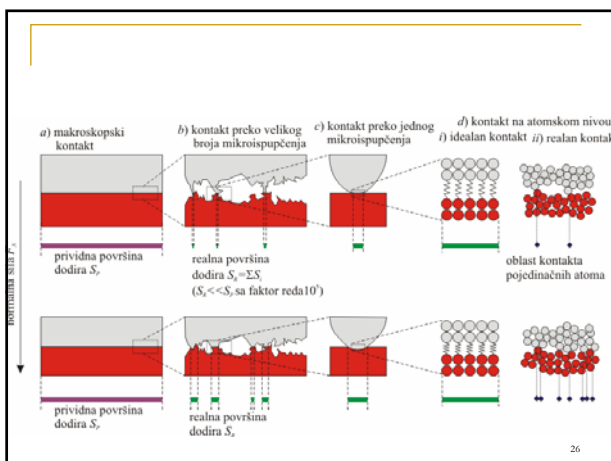
23

3. Историјски развој представа о трењу – 20 век

- Томлинсон, Дерјагин – адхезија
- Бовден и Табор 1950.
 - Контакт тела се успоставља преко "шиљака"/"испупчења"
 - Уведен појам
 - Привидне/геометријске додирне површине
 - Реалне додирне површине

24





3. Историјски развој представа о трењу – 20 век

■ Бовден-Табор

- Сила трења је сразмерна реалној додирној површини S_R

$$F_{tr} = \tau S_R$$

■ τ - напон смицања

$$\tau = \tau_0 + \alpha P$$

$$\mu = \mu_A + \mu_{AB}$$

■ Адхезивно и абразивно трење

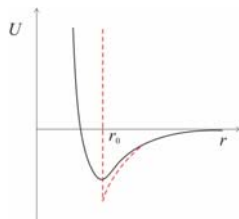
4. Трење и хабање и дисипација енергије

- Хабање - пластичне деформације
- Да ли је хабање=трење?
- Дуго се сматрало да је хабање одговорно за дисипацију енергије
- Томлинсон 1929.: ако је тако, точкови локомотиве би се потрошили након неколико километара
- То значи да **пластичне деформације**, иако их увек има, **не могу бити примарни узрок трења**
- Томлинсон: “само мањи део атома који учествују у контакту два чврста тела услед тога промени своја места”.

28

5. Адхезија

- Физичке основе адхезије – интеракција молекула
- Ленард – Џонсов модел – “потенцијал”
- И још једноставнији моделни

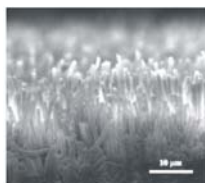


$$U(r) = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6}$$

29

5. Адхезија у природи

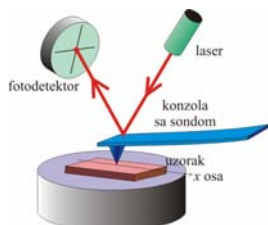
- Гекони – гуштери који могу да се пењу уз глатке површи
- Јаке адхезионе силе
- Роботи
- Ливење микровлакна
- На цм² 42 милиона влакана
- Дужина 20 микрона
- Пречник 600 нанометара
- **Постају лепљива након проклизавања**



30

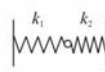
6. Микроскопија атомских сила (МАС)

- "Глачањем" се елиминише абразија
- Површи равне на атомском нивоу
- Конзола се деформише у два правца
 - Вертикално
 - Одбојне и привлачне силе
 - Хоризонтално
 - торзија
 - Изазивају је латералне силе



31

6. Микроскопија атомских сила



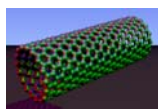
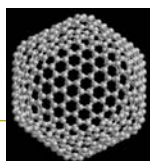
$$k_e = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

- Латерална крутост је повезана са крутошћу конзоле k_1 и крутошћу контакта сонде и узорка k_2 .

32

6. Микроскопија атомских сила

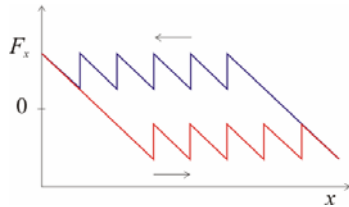
- Радијус кривине сонде је обично 10-50 nm
- Чини је група атома чија геометрија није стабилна (силицијум)
- Данас се користе фулерени од којих се праве наножице (C60)
- Имају добро дефинисану структуру и чврсти су



33

6. Микроскопија атомских сила

■ Типична слика

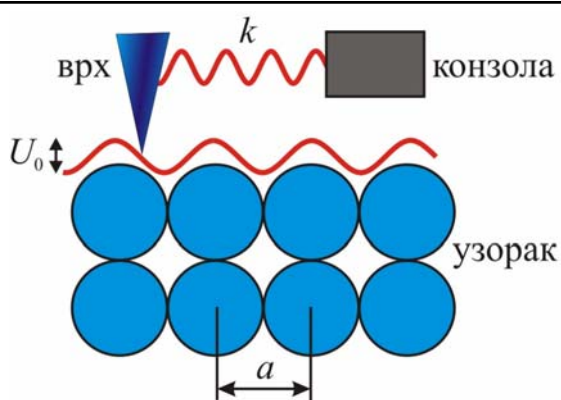


34

7. Stick-slip модел трења

- Експерименти МАС – последњих 20-30 година
- Објашњење?
- Модел из 20-их година прошлог века
- Сонда – шиљак (1 атом) који клизи по узорку
- Узорак – има периодичну структуру
- Систем конзола-сонда-узорак се представља еластичним системом

35

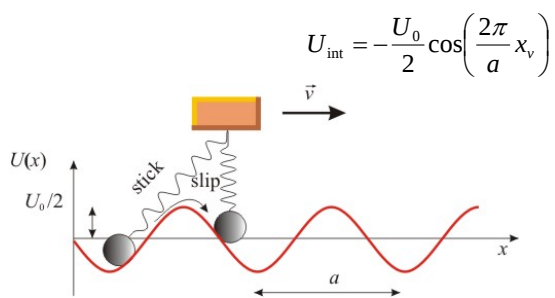


7. Stick-slip модел трења

- Прандтл-Томлинсонов модел
 - Интеракција сонде са узорком – преко конзервативне периодичне силе
 - Објашњава макроскопску силу статичког трења
 - Дисипативна сила типа Стоксове
 - Објашњава макроскопску силу динамичког трења

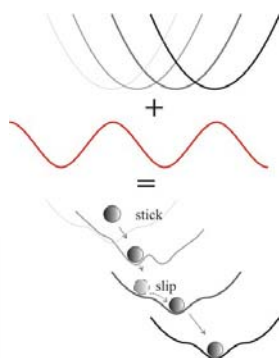
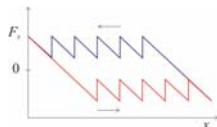
37

7. Stick-slip модел трења



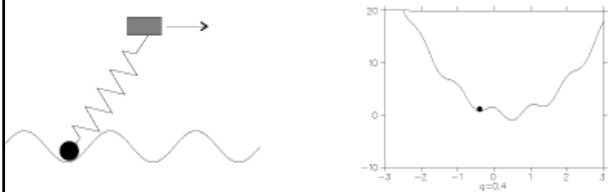
38

- Механичка адијабатичност
- Постоји хистерезис који описује губитак енергије

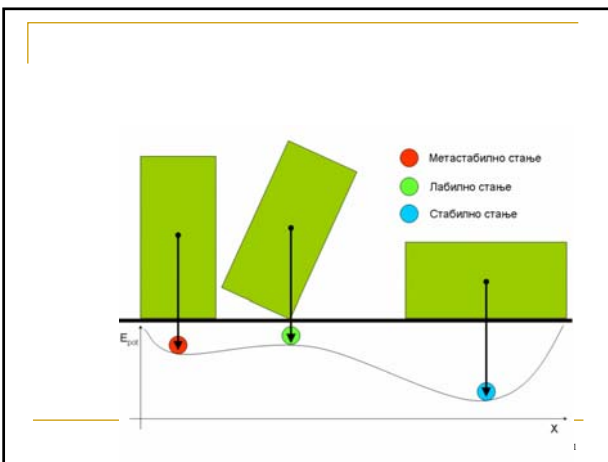


39

Метастабилна стања?!



40



Значај за наставу

- Модел као наставно средство
 - Ученици лакше прихватају научне чињенице ако им се оне адекватно визуелизују
 - Модел трења (сувог и клизајућег)
 - кутија глатких зидова која се вуче по глаткој подлози
 - ...
 - Требају нам нови модели за наставу
 - За детаљнија упутства питати моје сараднике.

42