

# Dosadašnja istraživanja u području biotribologije

---

**Mustapić, Irena**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:686995>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Irena Mustapić**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Irena Mustapić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na razumijevanju i strpljenju i što me je prihvatila za svoga studenta za završni rad.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima, obitelji i prijateljima na razumijevanju i potpori tijekom dosadašnjeg studiranja.

Irena Mustapić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Irena Mustapić**

Mat. br.: 0035206110

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dosadašnja istraživanja u području biotribologije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Recent progress in biotribology**

Opis zadatka:

Biotribologija se bavi proučavanjem svih triboloških komponenti u biološkim sustavima i jedno je od najbrže rastućih područja tribologije. To je interdisciplinarno polje znanosti koje utječe na sve aspekte našeg svakodnevnog života: od dizajna i ponašanja implantata, ponašanja sinovijalne tekućine u zglobovima, trenja i podmazivanja u okularnom okruženju pa sve do proizvoda za osobnu njegu. Kako bi dijelovi i sustavi u biološkom okruženju pravilno funkcionirali, biotribologija ima zadaću riješiti probleme s ciljem zadovoljavanja njihovih osnovnih funkcionalnih potreba.

U ovom je radu potrebno:

- 1) Prema dostupnoj literaturi dati pregled dosadašnjih biotriboloških istraživanja.
- 2) Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:  
**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020.  
**3. rok:** 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Suzana Jakovljević

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD.....	1
2. TRIBOLOGIJA I MEHANIZMI TROŠENJA.....	2
2.1. Abrazija.....	2
2.2. Adhezija .....	2
2.3. Umor površine.....	2
2.4. Tribokorozija.....	3
3. PODJELA BIOTRIBOLOGIJE .....	4
4. TRIBOLOGIJA U ORTOPEDIJI.....	6
4.1. Zglob kuka .....	6
4.2. Umjetni zglob.....	8
4.3. Budući razvoj tribologije u ortopediji .....	9
5. TRIBOLOGIJA KOŽE.....	12
5.1. Mehanizam kožne traume uzrokovane trenjem .....	12
5.2. Taktilna percepcija i hvatanje predmeta .....	13
5.3. Buduće smjernice u razvoju umjetne kože .....	14
6. ORALNA TRIBOLOGIJA.....	15
6.1. Trošenje zuba .....	15
6.2. Trošenje materijala implantata.....	18
6.2.1. Metali i legure .....	18
6.2.2. Keramika.....	19
6.2.3. Kompoziti .....	20
6.3. Tribološka svojstva sline.....	21
6.4. Budući razvoj oralne tribologije .....	22
7. TRIBOLOGIJA KOD OSTALIH DIJELOVA TIJELA ILI TKIVA.....	23
7.1. Kosa .....	23
7.2. Oko.....	23
8. ŽIVOTINJE I BILJKE .....	25
9. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA.....	28
PRILOZI.....	31

**POPIS SLIKA**

Slika 4.1.1. Spoj natkoljениčne i zdjelične kosti.....	7
Slika 4.1.2. Dijelovi kuka .....	7
Slika 5.1. 3D printana koža za transplataciju .....	13
Slika 6.1. Struktura zuba.....	15
Slika 6.2.1. Metalni implantat .....	19
Slika 6.2.2. Keramički implantat .....	20
Slika 7.2. Sustav oko-suzni film-kontaktna leća .....	24

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Klasifikacija biotriboloških istraživanja.....	4
---	---



## **SAŽETAK**

Biotribologija je znanost o trenju, podmazivanju i trošenju kada se primjenjuje na biološke sustave ili prirodne pojave. To je raznoliko i multidisciplinarno područje koje utječe na sve aspekte našeg svakodnevnog života, od protetskih implantata do proizvoda za osobnu njegu.

Ključne riječi: biotribologija, trenje, implantat, biomaterijali

## **SUMMARY**

Biotribology is the science of friction, lubrication and wear when applied to biological systems or natural phenomena. It is a diverse and multidisciplinary field which impacts all aspects of our daily life from prosthetic implants to personal care products.

Key words: biotribology, friction, implants, biomaterials

## 1. UVOD

O tribologiji je u posljednjih desetak godina objavljen impresivan broj stručnih i znanstvenih radova. Tribologija je ušla i u brojne udžbenike i nastavne programe. Zbog velikih ušteda u materijalima i doprinosu očuvanja čovjekova okoliša i uštedi energije, tribologiji se posvećuje sve veća pozornost. No, u posljednje vrijeme se uvodi još jedan segment tribologije poznat pod zajedničkim nazivom biotribologija. Biotribologija se bavi proučavanjem podmazivanja i trošenja u biološkim sustavima i posebno u ljudski organizam ugrađenih stranih tijela. Stručnjake koji se bave tim poslom nazivamo biotribolozima. Biotribolozi pomažu liječnicima, prvenstveno ortopedima, u rješavanju brojnih problema koji nastaju kad se pojedinim pacijentima ugrađuju proteze (npr. novi zglobovi) bez kojih ne bi mogli normalno obavljati osnovne funkcije. Prvenstveno se radi o kuku koji se slomi pri padu ili se jednostavno istroši i takav više ne obavlja osnovnu zadaću. Primjera radi treba spomenuti da se svake godine u SAD bolesnicima ugradi oko 300000 umjetnih kukova. Za izradu takvog kuka se u novije vrijeme najviše koriste legure iz kroma i kobalta koje se ugrađuju u bedrenu kost i ultravisoko molekularni polietilen koji služi kao dio zdjelice. Tako je predviđeno da ovakav umjetni kuk traje 10 do 15 godina. To razdoblje može kod pojedinih pacijenata biti i znatno duže, ali, nažalost, i kraće. Ako se uzme u obzir da prosječan čovjek tijekom jedne godine učini oko jedan milijun koraka, onda se vidi kako ti materijali moraju biti otporni na trošenje i izdržljivi u organizmu. Biotribolozi pretpostavljaju da se tijekom vremena odvaja godišnje iz takvog kuka između 74000 i 150000 submikrometarskih čestica koje organizam mora ukloniti. Općenito se ljudsko tijelo sastoji od 206 većih ili manjih kostiju koje pokreće oko 600 raznih mišića. Veliki dio pokreta ljudskog tijela nije pokretanje kostiju. Najbolji primjer su otkucaji srca ili treptaji oka. Ali i tu dolazi do svojevrsnog podmazivanja, a kao mazivo se pojavljuju suze, slina ili druge tekućine koje izlučuje ljudski organizam. Iz ovog prikaza se vidi dokle doseže znanost o podmazivanju – od podmazivanja primitivnih kotača i saonica u pradavnim vremenima, do podmazivanja u biotribološkom smislu prošlo je zaista vrlo dugo vremensko razdoblje. [1]

## 2. TRIBOLOGIJA I MEHANIZMI TROŠENJA

Naziv tribologija dolazi od grčke riječi tribos što znači trenje, trošenje i slično. Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju i o pratećim aktivnostima. Jednostavnije i razumljivije bi se moglo reći da je tribologija znanstveno – stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja [2]. Iako postoje različiti načini trošenja, vrste trošenja dijelimo na četiri osnovna mehanizma trošenja materijala: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija.

### 2.1. Abrazija

Abrazija je najčešći mehanizam trošenja materijala. Nastaje kao posljedica prodiranja vrhova tvrdoga materijala u površinske slojeve mekšega materijala i njihovoga međusobnog gibanja. Tvrde čestice ili tvrde izbočine nazivamo abrazivnim česticama, a mekše materijala koji se troši nazivamo abradirani materijal. Pri abraziji nastaju produkti ili čestice trošenja. Materijal abraziva može biti kamen, staklo, ugljen, cement, keramika i sl. Abrazivi su uglavnom mineralnoga podrijetla te se abrazija često zove i mineralno trošenje [3].

### 2.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje nastupa kada su dva nominalno ravna čvrsta tijela u kontaktu klizanjem, bez ili sa podmazivanjem, gdje je ključna adhezija (ili međusobno spajanje). Adhezija uslijed smicanja pojavljuje se na neravninama u kontaktu na međupovršini. Adhezijsko trošenje nastupa kada se neravnine - izbočine koje su uslijed klizanja u kontaktu smiču, što može rezultirati odvajanjem dijelova s jedne i dodatno 'naljepljivanjem' dijelova jedne površine na drugu površinu. Kako napreduje klizanje preneseni fragmenti mogu otpasti s površine na koju su preneseni i biti preneseni natrag na originalnu površinu, ili se mogu formirati čestice trošenja. Neke čestice trošenja su slomljene procesom zamora, za vrijeme ponovljenih opterećenja i rasterećenja što konačno rezultira odvajanjem čestica i kao posljedica gubitkom mase tijekom adhezijskog trošenja [4].

### 2.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Jedinični događaj umora površine možemo opisati u tri faze. U prvoj fazi nastaje

podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira uvijek ispod same površine. U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. U trećoj fazi dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje) [2].

#### **2.4. Tribokorozija**

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Važno je da se čestice trošenja kod tribokorozije stvaraju unutar vanjskog površinskog sloja. Budući da se radi o vrlo tankim slojevima, tribokorozija je redovito slabo intenzivan mehanizam trošenja. Premda se tribokorozija ubraja u osnovne mehanizme trošenja to je ipak kombinacija između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od prethodno opisanih osnovnih mehanizama trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine [2].

### 3. PODJELA BIOTRIBOLOGIJE

Biotribologija postaje jako bitan dio tribologije i spektar istraživanja unutar nje se proširuje. Na osnovu predmeta istraživanja, definirana je klasifikacija biotribologije i njihova zastupljenost.

**Tablica 1. Klasifikacija biotriboloških istraživanja [5]**

Vrsta istraživanja	Glavni predmeti istraživanja	Postotak zastupljenosti
Tribologija u ortopediji zgloba	zglob kuka, zglob koljena, zglobna hrskavica, zglobna tekućina, obnovljivi materijali zglobova, sučelja implantata	40%
Tribologija kože	briga o koži, sintetička koža, koža u kontaktu s predmetima (poput taktilne teksture, uređaja za brijanje, cipela, čarapa) za svakodnevnu uporabu, medicinski i sportski uređaji, medicinski i kozmetički tretmani, trenje kože i hvatanje predmeta, iritacija i nelagoda na koži	20%
Oralna tribologija	prirodni zubi, jezik, mandibularni zglobovi, slina, zubni implantati, pasta za zube, gutanje, obnovljivi zubarski materijali	10%
Tribologija ostalih dijelova ljudskog tijela i tkiva	dlake, kosti, kontaktne leće, očne površine, kapilarni protok krvi	

Medicinski uređaji i pomagala	Skalpeli, operativne pincete, kateteri, gastroskop, umjetni kardiovaskularni sustav, medicinske rukavice	30%
Životinjska tribologija	Gecko adhezija, kretanje životinja, skala pangolina, koža ribe i morskog psa, perje ptica, kišna glista, mravi, leptirovo krilo, školjke, puževi	
Biljna tribologija	lotusov list, dijatomeji	

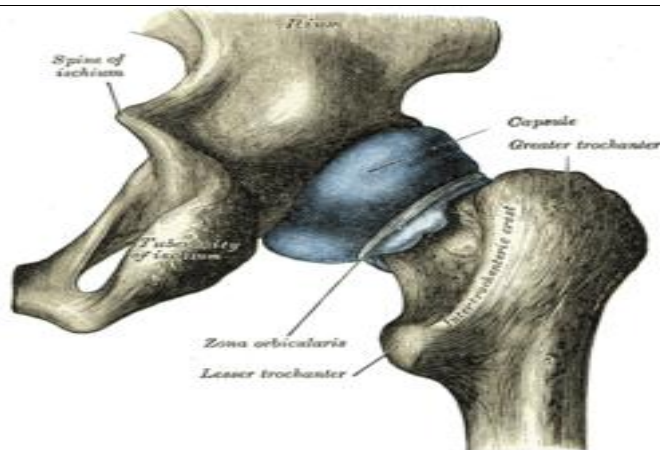
## 4. TRIBOLOGIJA U ORTOPEDIJI

Jedna od najvažnijih funkcija ljudskog mišićno-koštanog sustava (MKS) je sposobnost kretanja pri obavljanju svakodnevnih aktivnosti, što izravno utječe na kvalitetu života. Jedna od ključnih komponenti u MKS sustavu su sinovijalni zglobovi, poput kuka i koljena. Prirodni zglobovi u ljudskom tijelu predstavljaju ležajeve u tehničkom smislu; u ljudskom tijelu tijekom života prenose velika dinamička opterećenja i sposobni su za širok raspon pokreta. Međutim, bolesti poput osteoartritisa, reumatoidnog artritisa, a i traume zgloba ponekad zahtijevaju da se prirodni ležajevi zamijene umjetnim. Preko milijun zglobova godišnje se zamjeni širom svijeta. Tribološki mehanizmi imaju važnu ulogu u razumijevanju funkcioniranja prirodnih sinovijalnih zglobova i njihovoga propadanja i pri konstrukciji umjetnih zglobova. Tribološka ispitivanja prirodnih sinovijalnih zglobova i zglobnih implantata se obično provode u slučajevima trenja, trošenja i podmazivanja, uz posebna razmatranja biološke prirode zglobnog sustava. Ispitivanja trenja zglobnog sustava provedena su radi razumijevanja temeljnih triboloških mehanizama, dok se analize i modeliranja podmazivanja provode radi pružanja uvida u daljnje ponašanje. Istraživanje trošenja je obično najvažnije, jer izravno utječe na izdržljivost prirodnih i zamijenjenih zglobova. Iako se eksperimentalni pristupi obično usvajaju u tribološkim ispitivanjima zglobova, alternativni analitički i računski pristupi jednako su važni. Tribološka istraživanja prirodnih sinovijalnih zglobova i umjetnih nadomjestaka trebaju integrirati trenje, trošenje i podmazivanje kao i eksperimentalni i računski pristup. Nadalje, važnost biološkog razmatranja zglobova treba biti prepoznat; na primjer, ostatak zglobnih implantata može uzrokovati neželjene reakcije tkiva, a analiza propalih zglobnih implantata može pružiti važne smjernice za otkrivanje kvara mehanizma [6].

### 4.1. Zglob kuka

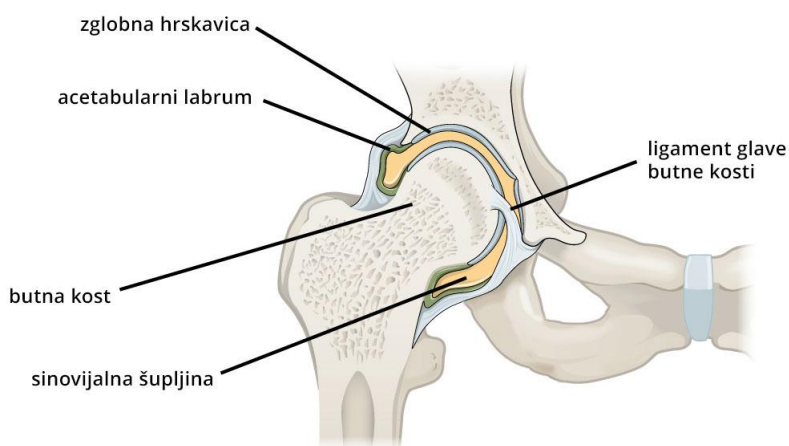
Zahvaljujući zglobu kuka ljudima je omogućeno hodanje. On je jedan od najvećih i najvažnijih zglobova u ljudskom tijelu. Nalazi se na spoju natkoljениčne kosti (lat. *femur*) i zdjelične kosti (lat. *pelvis*) pa se često naziva i acetabulofemuralnim zglobovom. Osim što zglobovi kuka omogućavaju hodanje, oni također služe kao potporanj gornjem dijelu tijela te štite reproduktivni sustav i donji probavni sustav [7].





**Slika 4.1.1. Spoj natkoljениčne i zdjelіčne kosti [8]**

Gornji dio natkoljениčne kosti koji je kuglastog oblika ulazi u acetabularnu šupljinu pelvisa (acetabulum) koja je prikazana na slici 4.1.2. Ona je oblika šuplje polukugle, te čini oslonac oko kojega natkoljениčna kost rotira, što omogućava hodanje [8].



**Slika 4.1.2. Dijelovi kuka [8]**

Zglobna hrskavica je gladak i sklizak dio tijela koji služi za prijenos opterećenja pri hodanju. Njena debljina ovisi o opterećenju; najdeblja je na mjestu najvećega pritiska pri hodanju. U prosjeku, njena debljina iznosi 6mm [9]. Hrani ju zglobna, odnosno sinovijalna tekućina kojom je hrskavica okružena. Sinovijalna tekućina zapravo služi kao lubrikant; njena je funkcija smanjivanje faktora trenja između zglobnih površina, odnosno da ih vlaži kako bi olakšala klizanje između njih. Osim što je zglob kuka povezan s hrskavicom, njega također okružuju mišići natkoljenice i ligamenti koji osiguravaju stabilnost i onemogućuju iščašenje [8].

## 4.2. Umjetni zglob

Umjetni zglobovi koriste se za liječenje bolesti zglobova poput osteoartritis i traume. Ispitivanja trenja, podmazivanja i trošenja umjetnih zglobova važni su čimbenici u cilju poboljšanja svojstava umjetnih ležajeva i poboljšanja kliničke funkcije. Trenutno je glavni klinički problem povezan s umjetnim zglobovima labavljenje protetskih komponenata, uglavnom kao rezultat neželjenih bioloških reakcija izazvanih ostatkom čestica trošenja. Čestice trošenja uglavnom se stvaraju na zglobnim površinama kao i na sučeljima za fiksiranje (bilo između biomaterijala, poput modularne veze između protetskih komponenata ili između biomaterijala i kosti). Uz to, metalni ioni mogu se osloboditi kao rezultat korozije. Sve to može rezultirati neželjenim biološkim reakcijama, što potencijalno može dovesti do gubitka kosti i osteolize i pseudotumora. Umjetne zglobove pacijentima ugrađuju kirurzi, pa stoga varijacije anatomije i opterećenja / pokreta i kirurške tehnike specifične za pacijenta mogu utjecati na to kako zglobni implantat funkcionira u tijelu. Važno je da se tribološka istaživanja kombiniraju s biološkim i kliničkim istaživanjima umjetnih zglobova. Različiti biomaterijali razvijeni su u raznim kombinacijama kako bi se smanjilo trošenje i stvaranje otpadnih tvari u umjetnim zglobovima. Trenutno većina umjetnih zglobova koristi kombinaciju materijala polietilena ultra visoke molekulske mase (UHMWPE) sa kobalt-kromom za zglob kuka i koljena. Trenutno korišteni UHMWPE uglavnom je umrežen (fizički ili kemijski), a trenutni cilj je poboljšati njegovu stabilnost dodavanjem vitamina E i drugih antioksidativnih dodataka [10]. Ostale kombinacije materijala za zglob kuka uključuju UHMWPE- keramiku i keramiku na keramiku. Aluminijev oksid uglavnom se koristio prije, ali u novije vrijeme oksidirana glinica ojačana cirkonijevim oksidom je uvedena kako bi se poboljšala žilavost i otpornost na trošenje, posebno pod lošim uvjetima dodira s rubom [11]. Također su korišteni ležajevi metal na metal, ali novija ispitivanja pokazala su promjenjiv postotak uspješnosti i stoga su u velikoj mjeri odbačeni u današnje vrijeme [12]. Konstrukcijski čimbenici, kao i kirurške varijable i varijable pacijenta, svi mogu doprinijeti neuspjehu metalnih implantata kuka. O tribologiji različitih kombinacija materijala za umjetne zglobove kuka napisan je niz preglednih radova. Pored ovih klinički korištenih ležajeva, istražuju se i druge nove kombinacije biomaterijala kao što su PEEK, keramika-metal i novi keramički materijali. Prepoznat je niz važnih čimbenika koji utječu na trošenje umjetnih zglobova, uključujući kombinacije ležajnih materijala, konstrukcije i čimbenike pacijenata / kirurških zahvata. Pokazalo se da su kombinacije materijala ležajeva glavni čimbenik u izvedbi trošenja umjetnih zglobova. Dokazano je da visoko umreženi UHMWPE

na metalnoj ili keramičkoj površini smanjuje volumen trošenja između 60% i 80%, u usporedbi s konvencionalnim UHMWPE, u laboratoriju i u manjoj mjeri u klinički dohvaćenim protezama. Upotreba keramičke površine može dodatno smanjiti trošenje zbog glatke površine i veće abrazivne otpornosti u usporedbi s metalnom površinom. Kombinacije keramika-keramika proizvode najmanje trošenja među kombinacijama materijala koje se trenutno klinički koriste, posebno kada se koristi keramika ojačana cirkonij-aluminijevim oksidom. Ležajne površine metala na metalu također mogu proizvesti malo trošenja, ali samo u idealnim uvjetima podmazivanja kada se kontakt dogodi prvenstveno unutar metalne čaše. Pod nepovoljnim uvjetima podmazivanja, na primjer kada je čaša postavljena previše vertikalno ili pod mikro-odvajanjem, a rubni kontakt dolazi do metalne čaše, zabilježen je znatno visok postotak trošenja. Budući da takvo stanje podmazivanja ovisi o konstrukciji implantata, kao i o pacijentu i kirurgu, klinički su neizbježno zabilježene varijabilne brzine trošenja i ishodi uspjeha. To je dovelo do trenutnog povlačenja većine metalnih implantata iz kliničke uporabe. Konstrukcija implantata također igra važnu ulogu u trošenju ležajnih površina. Najvažniji parametar konstruiranja zgloba kuka je radijus glave bedrene kosti. Općenito govoreći, veći radijus glave bedrene kosti bio je povoljniji u smislu biomehanike, ali može dovesti do povećanja klizne udaljenosti. U graničnim uvjetima podmazivanja, poput kombinacija UHMWPE-na-metalu, takvo povećanje rezultira povećanim volumenom trošenja. Sljedeći važan čimbenik konstruiranja je sukladnost dviju zglobnih površina. Za implantat kuka sukladnost uglavnom ovisi o radijalnom zazoru između glave femura i acetabularne čašice, dok je za implantat koljena radijus femura i tibije ležajnih površina. Općenito je prihvaćeno da je potrebna dovoljna usklađenost kako bi se minimaliziralo kontaktno naprezanje na ležajnim površinama. Međutim, novija istraživanja pokazala su da prevelika konformacija kontaktnih površina može povećati kontaktnu površinu i posljedično istrošiti. Nošenje umjetnih zglobova također značajno ovisi o pacijentima i kirurškim čimbenicima. Osobito je izazov baviti se tim čimbenicima u tribološkim istraživanjima zbog prirode opterećenja i kretanja specifične za pacijenta te varijabilnosti i pacijenta i kirurga. Različiti obrasci opterećenja i kretanja mogu proizvesti različita kretanja poprečnim posmikom, koja izravno utječu na trošenje UHMWPE-a [13].

#### **4.3. Budući razvoj tribologije u ortopediji**

Postignut je značajan napredak u razumijevanju triboloških mehanizama prirodnog sinovijalnog zgloba i u primjeni ovih inženjerskih principa za poboljšanje funkcije umjetnih zglobova. Trenutno se glavni naponi i dalje ulažu u minimiziranje trošenja i povećanje

životnog vijeka proteže. Alternativni pristup je odgoditi zamjenu zgloba uvođenjem ranih intervencija poput popravka i regeneracije hrskavice. Sve to znači da tribološke studije prirodnih sinovijalnih zglobova i umjetnih nadomjestaka mogu čak igrati povećanu ulogu u budućnosti. Za prirodne sinovijalne zglobove predloženi su različiti mehanizmi podmazivanja. Potpuno razumijevanje točnog mehanizma podmazivanja u ovim prirodnim ležajevima i dalje nam izmiče. Iako je općeprihvaćeno da mješoviti način mehanizama podmazivanja djeluje pod različitim uvjetima, i dalje je potrebno kvantificirati takve specifične uvjete. Bitno je modelirati puni spektar mehanizama podmazivanja od graničnog do punog fluidnog filma u prirodnim sinovijalnim zglobovima i identificirati uvjete kada bi određeni mehanizam dominirao. I dalje ostaje izazov ugraditi dvofaznu deformaciju zglobne hrskavice u modeliranje podmazivanja kao i razmatranje graničnog mehanizma podmazivanja. Rano liječenje, popravak ili čak regeneracija hrskavice obećavajuće je za budući razvoj liječenja bolesti zglobova. Važno je optimizirati tribološka svojstva biomaterijala, kao i osigurati zaštitu prirodne hrskavice i primjenjivati učinkovito podmazivanje [14]. Sva navedena tribološka razmatranja treba kombinirati zajedno s biološkim čimbenicima regeneracije hrskavice. Uloge dosadašnjih triboloških istraživanja i istraživanja o regeneraciji hrskavice, kao i odgovarajuća tribološka procjena, važne su. Većini sadašnjih istraživanja inženjerstva tkiva zglobne hrskavice pristupa se uglavnom s biološke perspektive. Iako je princip inženjerstva tkiva zglobne hrskavice dobro utvrđen, mehanička i tribološka svojstva hrskavice inženjerstva tkiva daleko su podređenija u usporedbi s prirodnim tkivima [15]. Tribološke stimulacije sve se više prepoznaju kao važna razmatranja u promicanju regeneracije hrskavice. Buduća uvođenja postupaka očuvanja i regeneracije hrskavice zahtijevaju razvoj relevantnih predkliničkih metoda ispitivanja koje bi trebale biti u stanju uzeti u obzir biološku prirodu sustava i dovoljno dugo razdoblje ispitivanja. Iako je velik napredak u inženjerstvu tkiva hrskavice, sadašnje napore treba posvetiti optimizaciji triboloških performansi i smanjenju trošenja umjetnih zglobova. Osim razvoja materijala otpornijih na trošenje, važno je i predkliničko ispitivanje implantata. Predkliničko ispitivanje trebalo bi biti pouzdano, istodobno, ne previše zahtjevno ili skupo. Predkliničko ispitivanje trebalo bi biti u stanju uhvatiti glavne načine vjerojatnosti kvara implantata i poboljšati trenutne relevantne standarde. Iako se većina trenutnih predkliničkih ispitivanja radi eksperimentalno u laboratoriju, alternativni pristup zasnovan na računalnom modeliranju može biti besplatan, posebno za modeliranje trošenja. Značajan napredak postignut je u razvoju modeliranja trošenja umjetnih zglobova. Računalno modeliranje također je idealno za

---

razmatranje sustava gdje se i biomehanika i tribologija zglobova mogu razmatrati na integrirani način [5].

## 5. TRIBOLOGIJA KOŽE

Koža je najveći organ ljudskog tijela. Pokriva između 1,6 i 2,0 m<sup>2</sup> površine ljudskog tijela u odraslih i čini oko 16% čovjekove težine [16]. Pokriva cijelo tijelo, štiti sve vrste tkiva i organa u tijelu od fizikalnih, kemijskih, mehanički udara i patogenih mikroorganizama, a jedan je od prvih obrambenih linija tijela od vanjskog okoliša. U svakodnevnom životu ljudska koža dolazi u kontakt sa raznim materijalima zbog rada, vježbanja, održavanja topline, zdravlja i ljepote, što uzrokuje mnoge probleme trenja kože. Tako, tribologija ljudske kože zanimljiva je tema istraživanja koja kontinuirano privlači znanstvenike da je proučavaju proteklih godina [5].

Mnogo je čimbenika koji utječu na trošenje kože: ponašanje ljudske kože pri trenju, površinska svojstva, hidratacija, fizička svojstva materijala koji je dodiruju, brzina klizanja i rotacije, etnička pripadnost, spol i dob, patološka procjena itd.

### 5.1. Mehanizam kožne traume uzrokovane trenjem

U svakodnevnom životu trenje između kože i radnog oruđa, materijala za zaštitu na radu, sportske opreme, neadekvatne obuće, tekstilnih materijala itd. Može izazvati traume na koži kao što su stvaranje žuljeva, iritacija ili senzibilizacija. Na primjer, interakcija između kože i protetske čahure obično uzrokuje povišenu ozljedu unutarnjeg trenja i bol u epidermisu i mišićnim tkivima, poput čireva pod tlakom, mjehura, cista, edema, iritacije kože, dermatitisa itd.. Osim toga, kod paraliziranih pacijenata često se javljaju rane od dugog ležanja. Iz mehaničkog pristupa, abrazija će dovesti do "bolnih mjesta", dijela kože koji pretrpi pretjerani stres i naprezanje, a na kraju rezultira stvaranjem mjehura. Zapravo, mjehurići nastaju uslijed sila trenja i lokaliziranog tlaka koji mehanički odvajaju površinske stanice epiderme od stratum spinosum. Hidrostatički tlak tada uzrokuje da se područje razdvajanja ispuni tekućinom sličnom sastavu kao plazma, ali s nižom razinom proteina [17]. Xing u radu [18] je upotrijebio dinamički nelinearni model konačnih elemenata s blister karakteriziranom strukturom i kontaktnim algoritmom za vanjske materijale i krov blistera kako bi istražio učinke na deformaciju i naprezanje postojećeg blistera promjenom faktora trenja i modula elastičnosti materijala u dodiru s mjehurićem. Model može predvidjeti učinke faktora trenja i krutosti kontaktnih materijala na deformaciju mjehura i naprezanje u žarištu. Uz to, koža ima sposobnost samoprilagođavanja trenju. Li [19] je istraživao samoprilagođavanje kože traumama trenja in vivo pod simuliranim uvjetima trljanja protetske čahure. Rezultati upućuju

da je tijekom procesa klizanja, koža kunića je prošla kroz precese trenja, rehabilitacije i samoprilagođavanja. Spajanje proteze i transtibijalne podloge obično se postiže čahuricom, što je kritična komponenta za protetske performanse i jedini način prijenosa tereta između proteze i podloge u trenutnoj protetskoj praksi. Nažalost, koža i temeljna meka tkiva podloge nisu pogodna za nošenje tereta. Interakcija između podloge i protetske čahure obično uzrokuje povišenu ozljedu unutarnjim trenjem i bol u epidermisu i mišićnim tkivima. Uz to, često trenje između preostalog dijela i protetskog materijala može uzrokovati trošenje, starenje i otkazivanje protetskog materijala. Stoga su tribološki čimbenici vrlo važni u konstruiranju i ugradnji kože. Zhang [20] je proučavao tlak, posmično naprezanje i djelovanje trenja na ostatku kože.



Slika 5.1. 3D printana koža za transplataciju [21]

## 5.2. Taktilna percepcija i hvatanje predmeta

Kao glavna prepreka koja nas štiti od agresije okoline, koža je posebno osjetljiva na širok raspon fizioloških podražaja poput boli, temperature, pritiska, vibracija i tako dalje, koja se nazivaju taktilna svojstva. Zapravo, pokretanje taktilnog osjeta tribološki je fenomen, koji ukazuje da bi signali trenja dobiveni djelovanjem trebali predstavljati izvore taktilnog osjećaja. Postoji pozitivna korelacija između osjećaja trenja i taktilnih osjeta. Li [22] je kvantitativno procijenio taktilne osjete tijekom ispitivanja trenja pomoću signala trenja i fizioloških signala vodljivosti, temperature i elektroencefalografije (EEG). Hvatanje predmeta svakodnevno je ponašanje koje se provodi trenjem prstiju o predmet. Istraživanje taktilne percepcije i mehanizmi hvatanja važni su u robotici, s ciljem realne simulacije senzornih zadataka i manipulacije objektima pomoću umjetnih sustava.

### 5.3. Buduće smjernice u razvoju umjetne kože

Buduća istraživanja o ponašanju trenja ljudske kože treba razmotriti i na makroskopskoj i na mikroskopskoj razini. U stvarnim kontaktnim uvjetima se moraju istražiti anizotropna mehanička svojstva (tlačni moduli / čvrstoća, moduli posmika / čvrstoća, puzanje i opuštanje kože) različitih slojeva kože i njihov utjecaj na trenje kože. Matematički i računski modeli kože moraju se poboljšati kako bi se razumjela deformacije kože i tribologija kože. Štoviše, treba razviti tehnologiju snimanja kože korištenjem optičke koherentne tomografije za proučavanje stvarnih kontaktnih uvjeta kože. Mehanizmi oštećenja kože, stvaranja mjehura, nabora i starenja kože u vezi s tribologijom kože moraju biti jasni radi prevencije. Potrebno je proučiti taktilnu percepciju i haptiku tijekom trenja kako bi se provjerila udobnost kontakta kože sa svakodnevnim potrebama i razvili programi u robotici [23]. Trenje ljudske kože na mikroskopskoj skali bit će ključ za razumijevanje makroskopskog ponašanja kože pri trenju. Treba se pozabaviti sljedećim visoko prioritarnim istraživačkim pitanjima[24]:

- Potrebno je precizno mjerenje adhezivne komponente trenja, odnosno precizno mjerenje stvarnog područja dodira (mikroskopska skala) i posmične čvrstoće kože. izvedena.
- Prevladavanje i odgovarajući uvjeti prianjanja i deformacija (viskoelastična histereza, oranje, međusobno spajanje) komponenata trenja se treba razumjeti i kvantificirati.
- Treba proučiti utjecaje hidratacije kože, vode i sebuma na mikromehanička svojstva kože, kao i povezane promjene u mikroskopskoj kontaktnoj geometriji.
- Potrebno je poboljšati odgovarajuće teorijske kontaktne modele za ljudsku kožu.



## 6. ORALNA TRIBOLOGIJA

Oralna tribologija tiče se svih aspekata tribologije povezanih s oralnim sustavima. Usna šupljina čovjeka sastoji se od nepca, brade, zuba, jezika, sluznice i žlijezda. Temporomandibularni zglobovi (TMZ) povezuje nepce s bradom. Trenje i trošenje u ustima obično je povezano s preradom različite hrane, oralnom higijenom i ortodontijom, pa je stoga neizbježno. Općenito, oralna tribologija uključuje studije na zubima, slini, TMZ-u i mekim tkivima usne šupljine. Za simuliranje tribološkog ponašanja oralnog sustava korištene su četiri vrste ispitnih metoda: kliničko ispitivanje *in vivo*, *in vitro* ispitivanje, ispitivanje *in situ* i analiza konačnih elemenata [25].

### 6.1. Trošenje zuba

Sastav i struktura ljudskog zuba Ljudski su zubi sastavljeni od cakline, spoja dentina i cakline, dentina i pulpe. Caklina sastavljena od 92–96% anorganskih tvari, 1-2% organskih materijala i 3-4% masenog udjela vode, najtvrdje je tkivo u ljudskom tijelu. Osnovna strukturna jedinica cakline je caklinska šipka ili prizma, koja se uglavnom sastoji od čvrsto nabijenog hidroksiapatita nalik vlaknima, a čini se približno okomito od spoja dentin-caklina prema površini zuba. Dentin je hidratizirani biološki kompozit koji se sastoji od 70% anorganskog materijala, 18% organske matrice i 12% masenog udjela vode, koji se smatra elastičnim i mekanim. Između cakline i dentina nalazi se spoj dentina i cakline, biološko sučelje. Općenito je caklina na okluzalnoj površini izložena oralnom kemijskom okruženju [5].



Slika 6.1. Struktura zuba [26]

Trošenje zuba, bilo prirodno ili umjetno, uglavnom je rezultat žvakanja. Žvakanje hrane, uključuje otvorenu i zatvorenu fazu. U otvorenoj fazi nisu uključene okluzijske sile, a tada se ne događa nikakvo ili vrlo malo trošenje zuba, dok se tijekom zatvorene faze na hranu primjenjuje okluzivno opterećenje, a tvrde čestice u hrani vuku se preko suprotnih površina, što uzrokuje trošenje okluzivne površine. Tegoza i bruksizam također mogu uzrokovati trošenje zuba. Tegoza je djelovanje klizanja zuba u bočne položaje, što se smatra genetski određenom navikom oštrenja zuba. Bruksizam, odgovor na stres i koji se klinički tretira kao patološko ponašanje, je djelovanje brušenja zuba bez prisutnosti hrane. Tijekom tegoze i bruksizma primjenjuju se okluzijske sile, a tada dolazi do trenja i trošenja zuba u izravnom kontaktu zub-zub. Nadalje, u današnje vrijeme kemijski učinci igraju sve važniju ulogu u trošenju zuba, uglavnom kao rezultat velike konzumacije kiselih pića. Uz to, trošenje zuba može rezultirati i čišćenjem zuba, kao što je pranje zuba, i navikama poput pušenja lule i žvakanja olovke. Umjereno trošenje zuba ima značajne kliničke posljedice, kako u estetskom, tako i u funkcionalnom smislu. Međutim, pretjerano trošenje zuba može rezultirati neprihvatljivim oštećenjem začepajućih površina, promjenom funkcionalnog puta žvakanja, preosjetljivošću dentina, pulpnom patologijom i tako dalje [26]. Zheng i Zhou u radu [27] proučavali su klizno trošenje i ponašanje trošenja cakline i dentina po titanijevoj kuglici s mazivom od umjetne sline. Rezultati su pokazali da caklinska zona pokazuje niži faktor trenja i bolju otpornost na trošenje u usporedbi s dentinskom zonom istog zuba. Trošenje cakline nastalo je uglavnom zbog mikrofrakturnog postupka i karakteriziralo ga je raslojavanje, dok je trošenje dentina rezultat oblikovanja duktilnih iverja i na istrošenoj površini pojavili su se jaki plugovi. Uz to, utvrđeno je da su tribološka ponašanja prirodnih zuba snažno povezana s orijentacijom mikrostrukture. Mass u radu [28] je istaknuo da varijacije orijentacije kristalita prizmatičnih caklina mogu pridonijeti optimalnoj zubnoj funkciji kroz svojstvo diferencijalnog trošenja u funkcionalno različitim dijelovima zuba. Klinički je uočeno da zvučna caklina u prosjeku gubi samo 10-40  $\mu\text{m}$  godišnje. Izvještava se da se trošenje cakline uglavnom kontrolira mehaničkim uklanjanjem materijala bez očitih promjena u sastavu i strukturi kristala. Arsecularatne i Hoffman u radu [29] istaknuli su da bi prijelom pod elastičnim kontaktom trebao biti odgovoran za trošenje cakline, a nastanak pukotina dogodio se u površini ožiljka od trošenja. Stoga su zaključili da je ponašanje cakline do neke mjere bilo poput keramike. Uz to, utvrđeno je da tribološka svojstva ljudskih zuba jako ovise o njegovoj dobi. U usporedbi s primarnim zubima, trajni zubi u mladim i srednjim godinama pokazali su bolju otpornost na trošenje. No kad su se u starosti uzimali u obzir trajni zubi, otpornost na trošenje je smanjena. U posljednje vrijeme provodi se sve više istraživanja

triboloških svojstava ljudske zubne cakline na mikroskopskoj ili nanoskalnoj razini kako bi se istražio učinak mikrostrukture i kemijskog sastava cakline. Caklina je pokazivala nehomogena nanomehanička svojstva i anizotropno mikrotribološko ponašanje, a osim toga, mehanička i tribološka svojstva caklinskih šipki snažno su ovisila o orijentaciji kristala hidroksiapatita unutar svake šipke. Utvrđeno je da je ponašanje cakline na nano-razini slično ponašanju visokokrskog stakla pri malom opterećenju od 50 mN i monokristalnog metala pri velikom opterećenju od 100 mN. Zheng u radu [30] otkrio je da, iako je sadržavala 92–96 mas.% anorganskih tvari (uglavnom hidroksiapatita), caklina je očito imala drugačije mikrotribološko ponašanje od umjetnog hidroksiapatita. U usporedbi s umjetnim hidroksiapatitom, značajnija plastična deformacija dogodila se u caklini pod malim opterećenjima, ali nije se dogodio krhki mehanizam raslojavanja ni pod velikim opterećenjima. Njihovi rezultati sugeriraju da sadržaj vode u caklini ima značajan utjecaj na njegova nanomehanička i mikrotribološka svojstva. Sadržaj vode mogao bi smanjiti vrijednost i fluktuaciju sile trenja na površini cakline i zaštititi površinu od oštećenja od trošenja. I okluzijski uvjeti (poput okluzijske hrapavosti i opterećenja površine) i svojstva čestica hrane (poput teksture i veličine) mogli bi utjecati na brzinu trošenja zuba. Utvrđeno je da se volumen trošenja cakline koji nastaje zbog čestica hrane postupno povećava s normalnim opterećenjem. Štoviše, s povećanjem opterećenja, brzine trošenja cakline i dentina pokazale su različitu tendenciju povećanja zbog različitih mikrostrukture i mehaničkih svojstava. Glavna odrednica postotka trošenja zuba na populacijskoj razini smatrana je abrazivnim svojstvima hrane. Gruba i abrazivna dijeta općenito je uzrokovala visoki postotak trošenja zuba drevnih ljudi, dok bi niski postotci trošenja zuba u suvremenoj populaciji uglavnom trebale biti rezultat oslanjanja na tvornički obrađenu hranu. Uz to, veće čestice proizvode manje, veće značajke trošenja na zubnim površinama od malih, a ukupno trošenje povećava se s veličinom čestica. Uz svjetski porast konzumacije bezalkoholnih pića, voćnih sokova i sportskih pića, izlaganje zuba kiselom okolišu postaje uobičajeno. Površinski gubitak tvrdog zubnog tkiva uslijed kemijskog procesa bez sudjelovanja mikroorganizama u stomatološkoj je literaturi definiran kao „erozija“. Taj postupak mogu uzrokovati vanjski (poput kiselih tvari, pića, grickalice i izloženost okoliša kiselim agensima) ili svojstveni agensi (kao što je ponavljano povraćanje kao dio anoreksije ili bulimije i regurgitacija želučanog sadržaja). Utvrđeno je da je erozija zuba povezana s vremenom i položajem erozije, a vanjska caklina pokazuje bolju otpornost na eroziju. Kiselo erodirana caklina osjetljivija je na abraziju i istrošivanje od netaknute cakline jer povećana kiselost u ustima može smanjiti i tvrdoću i modul elastičnosti cakline. Općenito, trošenje zuba uzrokovano erozijom

kombinirani je učinak demineralizacije površine zuba erozivnim sredstvom i abrazije demineralizirane površine okolnim uskim mekim tkivima, žvakanjem hrane i četkanjem zuba. Pacijenti s klinički evidentnom nepčanom erozijom pokazali su 10 puta veći postotak trošenja od onih bez ikakvih dokaza o abnormalnom trošenju. Izvješteno je da se postotak trošenja zuba povećava sa smanjenjem pH vrijednosti. Štoviše, trebao bi postojati konkurentski mehanizam između mehaničkog djelovanja i kemijskog djelovanja kada se caklina istrošila u otopini limunske kiseline. Učinak erozije na trošenje cakline bio je očigledniji pod malim opterećenjem nego pod velikim opterećenjem. Erozivna oštećenja zuba mogu se u određenoj mjeri popraviti remineralizacijom. Slina je izvor anorganskih iona neophodnih za remineralizaciju, jer opskrbljuje kalcijevim i fosfatnim ionima za izgradnju blokova. Dakle, ljudski zubi imaju određenu sposobnost samoobnavljanja putem remineralizacije u prirodnom i umjetnom okruženju sline. Sugeriralo se da bi unos kalcija, fosfata i fluorida mogao smanjiti demineralizaciju zuba i pojačati remineralizaciju. Nedavno je sve više i više rezultata pokazalo da kazein fosfopeptidestabilizirani amorfní kalcijev fosfat ima potencijal za promicanje remineralizacije zuba [5].

## **6.2. Trošenje materijala implantata**

### **6.2.1. Metali i legure**

S obzirom da se boja uvelike razlikuje od boje zubnog tkiva, metali i legure danas se uglavnom primjenjuju na ortodontske uređaje i zubne implantate. Korozija se uglavnom uzimala u obzir pri odabiru metalnih restorativnih materijala zbog njihove biokompatibilnosti i citotoksičnosti. Općenito je pokretanje i širenje korozije usko povezano s prirodom metalnih legura, ali tehnike čistoće, lijevanja i taljenja također utječu na ponašanje korozije metalnih legura. Zbog izvrsne biokompatibilnosti, otpornosti na koroziju i male težine, komercijalno čisti titanij (CP-Ti) i njegove legure sve se više primjenjuju na zubnim nadoknadama, posebno na implantatima; međutim, CP-Ti je inferioran u odnosu na konvencionalne zubne legure u tribološkim svojstvima. Otpornost na trošenje CP-Ti može se poboljšati legiranjem. Većina kliničara ističe da je trenje u sustavima fiksnih ortodontskih uređaja štetno. Pojačano trenje između tkiva sluznice i površine metalnih nosača može uzrokovati bol i nelagodu usne sluznice. Ponašanje trenja ortodontskih kombinacija metalnih nosača i žice povezano je s čimbenicima kao što su materijali za žicu i nosače, njihova veličina i oblik, dimenzije proreza, sastav površine, hrapavost i čistoća, pozicioniranje nosača u 3-dimenzionalnom prostoru, sila vezanja i vrsta ligacije, udaljenost između nosača i podmazivanje. Trošenje jabučica može rezultirati kvarom zubnih implantata. Yu je u radu [31] istražio tangencijalno ponašanje

frettinga legure titanija (TC4) prema bedrenoj kosti ljudskog korteksa kako bi razumio ponašanje frettinga na sučelju fiksiranja zubnih implantata. Rezultati su pokazali da bi se tijekom dugotrajnog korištenja zubnih implantata, zbog opetovanog djelovanja okluzivnog opterećenja, početno stanje kontakta na sučelju kost-implantat moglo razlikovati s nakupljanjem površinskih oštećenja. Dakle, došlo je do popuštanja zubnih implantata.



**Slika 6.2.1. Metalni implantat [32]**

### **6.2.2. Keramika**

Za razliku od metalnih obnovljivih materijala, prednosti keramike u stomatologiji su njezin prirodni izgled i trajna kemijska i optička svojstva. Općenito, keramika pokazuje relativno visoku otpornost na trošenje, ali njihov krhki lom može klinički prouzročiti katastrofalne rezultate. Kako bi se šteta krhkim lomom svela na najmanju moguću mjeru, u proteklim desetljećima mnogo je rađeno na razvoju zubne keramike visokog stupnja. Izvješteno je da se yttria stabilizirani tetragonalni poliskristal cirkonija (Y-TZP), cirkonijeva keramika visoke žilavosti, može koristiti kao alternativa porculanima ili staklokeramici u stražnjim restauracijama. Većina keramičkih nadomjestaka može biti abrazivna i tada stvara suprotno okluzijsko trošenje prirodne ili umjetne denticije. Stoga su mnogi istraživači istraživali trošenje cakline o različite keramike. Rezultati pokazuju da mikrostruktura i karakteristike površine keramike (poput glatkoće ili glazure) i uvjeti okoline značajno utječu na trošenje cakline i keramike. Glaziranje i / ili poliranje mogu donekle smanjiti trošenje cakline uzrokovano zubnom keramikom u ranoj fazi kontakta; međutim, pozitivan učinak brzo bi se izgubio kada se materijal stavi u funkciju u ustima. Feldspatični zubni porculani koji se slabo stapaju mogli bi prouzročiti manje trošenje suprotnih zuba u usporedbi s uobičajeno korištenim feldspatskim porculanima. Cirkonijeva keramika je postigla vrhunsko ponašanje

pri trošenju i niže antagonističko trošenje u usporedbi s uobičajenom keramikom. Zubna keramika se kemijski oštećuje u ustima, a tada se može dogoditi degradacija površine. Ako je degradirana keramička površina dalje podvrgnuta disfunkcionalnoj okluziji ili parafunkcionalnim navikama poput bruksizma, postupak trošenja može se ubrzati. Najveća razgradnja zubne keramike Y-TZP se događa u kiselom okolišu [5].



**Slika 6.2.2. Keramički implantat [33]**

### **6.2.3. Kompoziti**

Zbog svojih izvrsnih estetskih svojstava, zubni kompozitni materijali sve više dobivaju na značaju i popularnosti za restauraciju. Glavni problem zubnih kompozita je njihova ograničena otpornost na trošenje kada se koriste kao nadomjesci za nadoknadu. Puno se radilo na poboljšanju otpornosti zubnih kompozita na trošenje. Utvrđeno je da je postupak trošenja kompozita povezan s karakteristikama, sadržajem i raspodjelom punila, prirodnom matrice i čvrstoćom međupovršinske veze između punila i matrice. Veličina, oblik, tvrdoća i krhkost punila imaju važnu ulogu u procesu trošenja zubnih kompozita. Hibridni kompoziti s mikro punjenjem i malim česticama imali su bolju otpornost na trošenje u usporedbi s kompozitima koji su sadržavali velike čestice punila ( $41\ \mu\text{m}$ ). Sferne i nepravilne čestice punila mogu postići superiorno ponašanje trošenja zubnih kompozita i niže antagonističko trošenje u usporedbi s oštrim i šiljastim česticama. Tvrde i žilave čestice punila imaju visoku sposobnost nošenja tereta, a zatim povećavaju ukupnu otpornost materijala na trošenje, ali tvrdoća čestica punila ne smije biti veća od tvrdoće kristala hidroksiapatita na ljudskoj caklini. Sadržaj i raspored punila također imaju značajan utjecaj na otpornost na trošenje zubnih kompozita. Trošenje se može smanjiti povećanjem volumena punila. S obzirom na to da čestice punila smještene vrlo usko mogu zaštititi smolu od abraziva, upotreba finijih čestica za udio punila s fiksnim volumenom može smanjiti trošenje. Općenito, s povećanjem stupnja tvrdoće, čvrstoće i žilavosti polimerne matrice, abrazivni kapacitet kompozita značajno se povećava. Uz to, dobro prijanjanje punila / matrice može poboljšati sposobnost prijenosa naprezanja, zaštititi matricu i ometati širenje pukotina, a time i smanjiti trošenje. Oralni čimbenici, posebno oralno

kemijsko okruženje, imaju značajne učinke na proces trošenja i in vivo razgradnju kompozitnih nadomjestaka. Kada je izložen određenim tekućinama koje simuliraju kemikalije / hranu, smolasta se matrica može omekšati, a punila isprati. Stoga bi se otpornost na trošenje znatno smanjila. Visok stupanj izlječenja matrice mogao bi spriječiti propadanje kompozitnih nadomjestaka u dugotrajnoj izloženosti oralnom okolišu [5].

### 6.3. Tribološka svojstva sline

Slina je najvažnija komponenta kemije ljudskih usta. Sastoji se od približno 98% vode i različitih elektrolita i proteina. Proteini slinovnice mogu se selektivno adsorbirati na sve čvrste supstrate, kao i na membrane sluznice izložene oralnom okruženju, a zatim u roku od nekoliko sekundi formirati stečenu slinovnu pelikulu. Važna funkcija sline je oblikovanje graničnog sustava za podmazivanje i služiti kao mazivo između tvrdog (zuba) i mekog (sluznice) tkiva kako bi se smanjilo trošenje zuba i smanjilo trenje usne sluznice i površina jezika kako bi se spriječile lezije i olakšalo gutanje. 2009. godine Sajewicz [34] je izvijestio da viskoznost sline nije imala značajan utjecaj na njezin faktor trenja, a mehanizam podmazivanja sline trebao bi se temeljiti na potpunom odvajanju kliznih površina slinovim filmom. Izvijestio je da film slinovnice nastaje slojevitom adsorpcijom bjelančevina slinovnice, a zatim ima heterogenu strukturu koja se sastoji od tankog i gustog unutarnjeg sloja i debelog, visoko hidratiziran i viskoelastičan vanjski sloj. Unutarnji sloj slinovnog filma mogao bi učinkovito smanjiti trenje i trošenje zuba, a zatim igrati važnu ulogu u mazivim svojstvima sline. Oralni fiziološki uvjeti mogu utjecati na strukturu filma slinovnice, ali uglavnom se utječe na vanjski film slinovnice. Čak i u surovom okruženju usne šupljine, primijećeno je da je unutarnji film slinovnice još uvijek netaknut. Čini se da je vanjski film slinovnice prirodna barijera između unutarnjeg filma slinovnice i okoliša usne šupljine. Rekao je da su performanse podmazivanja i sastav filma slinovnice usko povezani sa svojstvima površine podloge, kao što su hrapavost površine, površinska slobodna energija i površinski kemijski sastav ili naboj. Harvey je u radu [35] primijetio da je faktor trenja na hidrofobnom supstratu gotovo red veličine veći od onog na hidrofilnom supstratu. Stoga bi se hidrofobni materijali u usnoj šupljini mogli lakše očistiti od adsorbiranih filmova slinovnice. Zaključeno je da je čvrstoća prijanjanja filma slinovnice mnogo manja s hidrofobnim supstratom nego s hidrofilnim supstratom. Smatra se da je uloga pelikule slinovnice zaštita temeljne površine zuba od napada kiseline, jer je ublaživač za kiseline uvedene u usta. Čak i tanki film slinovnice (debljine 100-500 nm) može zaštititi izloženu površinu materijala od kiseline, čime se sprječava njezino uklanjanje tijekom sljedeće faze trenja.

#### **6.4. Budući razvoj oralne tribologije**

Kao što je u prethodim poglavljima spomenuto, trenje i trošenje zuba neizbježni su životni procesi zbog normalne oralne funkcije. Međutim, ljudski zubi, najveći organ protiv trošenja u tijelu, mogu zadovoljno poslužiti desetke godina ili čak gotovo stogodišnjicu, ovisno o uvjetima. Nema sumnje da su ljudski zubi vrhunski prirodni nosivi sustav. U stvari, mnogi su tribološki sustavi u inženjerstvu poput pogona zupčanika, sustava tračnice / kotači više ili manje slični paru trenja ljudskih zuba. Razvojem znanosti o materijalima i tehnologije inženjerstva površina otpornost na trošenje inženjerskih sustava znatno je napredovala. Međutim, kvar nosivih sustava i njegove ozbiljne posljedice često se javljaju u inženjerstvu. Stoga bi se veći naglasak trebao staviti na razumijevanje zašto ljudski zubi posjeduju tako izvrsna svojstva protiv trošenja, što može pomoći u dizajniranju budućih inženjerskih sustava protiv trošenja sa zadovoljavajuće dužim vijekom trajanja protiv trenja i trošenja [5]. Buduća istraživanja trebala bi obratiti pažnju na sljedeće aspekte:

- Utjecaj mehaničkog opterećenja na mikrostrukturu i tribološka svojstva ljudskih zuba.
- Korelacija između mikrostrukture i triboloških svojstava ljudskih zuba.
- Mehanizam oštećenja ljudskih zuba u složenim načinima opterećenja.
- Palijativna studija i studija samoobnavljanja trošenja zuba.
- Primjena u zubnom restorativnom materijalu i sustavima protiv trošenja u praksi.
- Sličnosti i razlike u tribološkom ponašanju između ljudskih zuba i zuba različitih sisavaca.



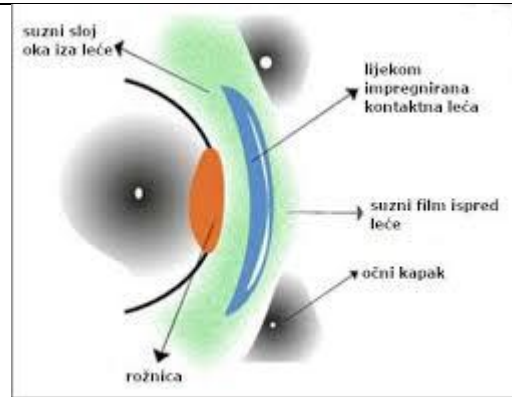
## 7. TRIBOLOGIJA KOD OSTALIH DIJELOVA TIJELA ILI TKIVA

### 7.1. Kosa

Njega i održavanje lijepe kose svakodnevni je postupak za većinu ljudi, dok su trenje i prianjanje glavni, najvažniji parametar za njegu kose. Faktor trenja je koristan jer služi kao kvantitativni biljeg za čovjekovu percepciju osjećaja, a današnja istraživanja usredotočena su na korelacije između svojstava trenja u makro i mikro mjerilu i strukturu kose pod raznim eksperimentalnim uvjetima. Bhushan je u [36] proučavao učinke i usmjerenost skale tribološkog ponašanja kose i ukazao je na tu makro skalu. Podaci o sili trenja jasno su pokazali učinke usmjerenosti; faktor trenja koji je najveći na makro skali, nakon čega slijedi vrijednost mikro skale, a zatim nano skale. Koristeći mikroskopiju atomske sile, Smith [37] je izmjerio vrijednost faktora trenja na mikro skali, površinsku adheziju i energiju prianjanja za podstrukture europske smeđe kutikule kose. Ova istraživanja su korištena za traženje formulacije za proizvode i tretmane za njegu kose. Međutim, još se nije istražilo kako izbjeći oštećenje kose i poboljšati njezinu kvalitetu putem osnovnih metoda poput prehrambenih navika.

### 7.2. Oko

Oko je tipičan primjer podmazanog pokretnog sustava u ljudskom tijelu. Suzni film pruža zaštitu rožnici i održava optičku glatkoću vida. Očna tribologija privukla je veliku pozornost, posebno od uvođenja kontaktnih leća. Postoje dvije glavne tribološke interakcije u oku. Jedno sučelje javlja se između kapka i rožnice u prirodnom oku, dok se za kontaktne leće formiraju dva sučelja između kontaktne leće, kapka i rožnice. Glavna tribološka pitanja usredotočila su se na svojstva suznog filma i njegov mehanizam podmazivanja, prianjanje i trenje različitih kontaktnih leća, udobnost ljepljenja kako bi se razvile zadovoljavajuće kontaktne leće. Na primjer, Dunn je u [38] analizirao režime podmazivanja kod nositelja kontaktnih leća tijekom treptaja i predložio numerički model fluida rezultirajućeg tlaka i brzina klizanja kod oba para klizanja. Zhou [39] je proučavao svojstva trenja mekih kontaktnih leća i pokazao da je sila trenja proporcionalna normalnom opterećenju, a faktor trenja povećan brzinom u slanoj otopini. Međutim, potrebno je provesti daljnja ispitivanja korelacije između svojstava ljepila i trenja i biološkog odgovora kontaktnih leća, poput plakanja, bakterijske infekcije.



Slika 7.2. Sustav oko-suzni film-kontaktna leća [40]

## 8. ŽIVOTINJE I BILJKE

U području inženjstva i medicine provode se mnoga istraživanja životinja i biljaka u cilju oponašanja određenih svojstava koja oni posjeduju. Superhidrofobnost, samoočišćenje, smanjenje otpora u smjeru strujanja, pretvorba i očuvanje energije, visoka mogućnost prijanjanja, povratna adhezija, aerodinamički uzgon, materijali i vlakna visoke mehaničke čvrstoće, biološko samookupljanje, antirefleksija, strukturna obojenost, toplinska izolacija, samoiscjeljivanje i osjetilna potpora mehanizama samo su neki od primjera koje nalazimo u prirodi a koje bi bile korisne u tehnici i medicini [41].

Utvrđene su i proučene tri vrste interakcija životinja i supstrata: ribe u vodi, ptice u zraku i fosorne životinje u tlu. RIBE imaju značajke dragredukcije, superoleofilnosti i superoleofobnosti zahvaljujući mikro / nano hijerarhijskoj strukturi u vodenoj fazi. Ljuske ribe prekrivene su orijentiranim mikropapilama s nanostrukturama, a koža morskog psa, jedne od brzoplivućih životinja u oceanu, također je prekrivena plakoidnim ljuskama. Te ljuske sastavljene od pravokutne baze ugrađene u kožu sa sitnim bodljama imaju uzdužne žlijebove. Takva struktura smanjit će vrtloge paralelne s lokalnim smjerom strujanja vode i pridaje malo trenje ribama tijekom plivanja. Slično tome, zabilježena su istraživanja smanjenja otpora na pticama i leptirima. Ptice su primjer gdje uglavnom postoje dvije vrste perja. Primarno perje je najveće i najudaljenije od tijela za pokretanje ptica koje lete zrakom, a sekundarno perje duž kraka krila za podizanje ptica u zrak. U usporedbi s ribama i pticama, životinje koje su na tlu imaju bolju otpornost na trošenje, niža ljepljiva svojstva i učinak samočišćenja. Na primjer, pangolin, životinja, prekrivena je ljuskama koje često trljaju tlo i stijene. Tong je pokazao da prirodna valovita površina ljuskica pangolina i orijentacija valovitosti nude bolje ponašanje pri trošenju i učinak samoejekcije čestica kroz dva ispitivanja abrazivnog trošenja na tijelu. Zapravo, velik je rad posvećen izradi različitih površinskih struktura za jedinstvenu površinsku funkciju kroz biomimetički ili bio-nadahnuti pristup. Međutim, postoji vrlo malo izvještaja o umjetnim površinama, koje bi se mogle podudarati s prirodnim bio-površinama nakon što su se razvijale tijekom milijuna godina.

U usporedbi s ljudskom ili životinjskom tribologijom, čini se da je napredak u biljnoj tribologiji spor, vjerojatno zbog manje pažnje ili nedostatka znanja o relevantnim svojstvima biljaka. Međutim, kao jedna od više od 200 biljnih vrsta koje odbijaju vodu, list lotosa, zbog svoje superhidrofobnosti, poznat i kao učinak lotosa, uglavnom je istražen. Dokazano je da

epidermalne stanice lišća lotosa tvore papile, koje prekriva vrlo gusti sloj epikutikularnih voskova. Epikutikularni voskovi imaju hidrofobna svojstva, koja zajedno s mikro- i nanostrukturnom hrapavošću rezultiraju smanjenom površinom kontakta između kapljica vode i površine lista. Do danas se čini da je više studija usmjereno prema razvoju bioničkog dizajna i izradi superhidrofobnih površina za civilnu i vojnu primjenu. Uz to, postoji nekoliko istraživanja o tribologiji algi, posebno o tribologiji dijatomeja s jednostaničnim mikroalgama. Dijatomeji pokazuju vrlo učinkovito samopodmazivanje dok se stanice dijele i rastu i možda slijede učinkovitu strategiju podmazivanja [5].

## **9. ZAKLJUČAK**

Biotribologija je jedna od najuzbudljivijih i najbrže rastućih područja trenutnih interesa. Vođena poboljšanjem kvalitete života i nadahnuta prirodnim tribološkim sustavima, provodi se sve više istraživanja. Postignut je velik napredak, ali ostaje razotkriti još mnogo toga.

## LITERATURA

- [1] Šušak M., Zanimljivosti iz svijeta, 2004.
- [2] Eterović, O., Analiza tragova trošenja kod endoproteza kuka, FSB, Zagreb, 2015.
- [3] Jelenski, A.D., Utjecaj parametara precipitacijskog očvrnuća na abrazijsku otpornost aluminijske legure, FSB, Zagreb, 2019.
- [4] [https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/Nastavni\\_materijali\\_za\\_kolegij\\_Inzenjerstvo\\_povrsina\\_poglavlje\\_TRIBOLOGIJA.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/Nastavni_materijali_za_kolegij_Inzenjerstvo_povrsina_poglavlje_TRIBOLOGIJA.pdf) , pristupljeno 1.9.2020.
- [5] Z.R. Zhou, Z.M. Jin, Biotribology: Recent progresses and future perspectives, Elsevier B. V., 2015.
- [6] D. Dowson, Z.M. Jin, Special issue on biotribology, in: Proceedings of the IMechE, Part J: J. Engineering Tribology, vol. 220, no. J8, 2006,
- [7] Vorih M., Dinamička izdržljivost endoproteze zgloba kuka, FSB, Zagreb, 2013.
- [8] Zechner J., Izrada idejnog koncepta modela tribouređaja za trošenje implantata kuka, FSB, Zagreb, 2020.
- [9] Platzer, W.: Priručni anatomske atlas, Prvi svezak: Sustav organa za pokretanje, Medicinska naklada, Zagreb 2003.
- [10] E. Oral, A. Neils, O.K. Muratoglu, High vitamin E content, impact resistant UHMWPE blend without loss of wear resistance, J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater., 2014.
- [11] J. J. Halma, J. Señaris, D. Delfosse, R. Lerf, T. Oberbach, S. M. van Gaalen, A. de Gast, Edge loading does not increase wear rates of ceramic-on-ceramic and metal-on-polyethylene articulations, 2014.
- [12] A. Rajpura, D. Kendoff, T. N. Board, The current state of bearing surfaces in total hip replacement, Bone and Joint Journal, 2014.
- [13] G. P. Chimata, C. J. Schwartz, Investigation of friction mechanisms in finger pad sliding against surfaces of varying roughness, Biotribology, Elsevier, 2015.
- [14] L. McCann, E. Ingham, Z. Jin, J. Fisher, An investigation of the effect of conformity of knee hemiarthroplasty designs on contact stress, friction and degeneration of articular cartilage: a tribological study, Journal of Biomechanics, Elsevier, 2009.
- [15] M. Plainfossé, P.V. Hatton, A. Crawford, Z.M. Jin, J. Fisher, Influence of the extracellular matrix on the frictional properties of tissue-engineered cartilage, Biochem. Soc. Trans., 2007.

- [16] P. Agache, P. Humbert, *Measuring the Skin—Non-Invasive Investigations*. Physiology, Normal Constants, Springer-Verlag, Berlin, 2004
- [17] J.J.R. Knapik, K.L. Duplantis, B.H. Jones, Friction blisters, pathophysiology, prevention and treatment, *Sports Med.* 20, 1995.
- [18] M. Xing, N. Pan, W. Zhong, H. Maibach, Skin friction blistering: computer model, *Skin Res. Technol.* 13, 2007.
- [19] W. Li, S.X. Qu, Y.J. Zheng, Q. Pang, J. Zheng, Z.R. Zhou, Skin selfadaptation to friction trauma under reciprocal sliding conditions, *Tribol. Int.* 44, 2011.
- [20] M. Zhang, A.R. Turner-Smith, A. Tanner, V.C. Roberts, Clinical investigation of the pressure and shear stress on the transtibial stump with a prosthesis, *Med. Eng. Phys.* 20, 1998.
- [21] <http://pixelizam.com/5-nevjerovatnih-primjera-primjene-3d-printanja-u-medicini/>, pristupljeno 15.9.2020.
- [22] W. Li, Q. Pang, Y.S. Jiang, Z.H. Zhai, Z.R. Zhou, Study of physiological parameters and comfort sensations during friction contacts of the human Skin, *Tribol. Lett.* 48, 2012.
- [23] X. Liu, R. Lewis, M.J. Carré, S.J. Matcher, Feasibility of using optical coherence tomography to study the influence of skin structure on finger friction, *Tribol. Int.* 63, 2012.
- [24] S. Derler, A. Rao, P. Ballistreri, R. Huber, A. Scheel-Sailer, R.M. Rossi, Medical textiles with low friction for decubitus prevention, *Tribol. Int.* 46, 2012.
- [25] Z.R. Zhou, J. Zheng, Tribology of dental materials: a review, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41, 2008.
- [26] L.H. Mair, T.A. Stolarski, R.W. Vowles, C.H. Lloyd, Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop, *J. Dent.* 24, 1996.
- [27] J. Zheng, Z.R. Zhou, J. Zhang, H. Li, H.Y. Yu, On the friction and wear behavior of human enamel and dentin, *Wear* 255, 2003.
- [28] M.C. Mass, Enamel structure and microwear: an experimental study of the response of enamel to shearing force, *Am. J. Phys. Anthropol.* 85, 1991.
- [29] J.A. Arsecularatne, M. Hoffman, On the wear mechanism of human dental enamel, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 3, 2010.
- [30] J. Zheng, Y. Li, M.Y. Shi, Y.F. Zhang, L.M. Qian, Z.R. Zhou, Microtribological behaviour of human tooth enamel and artificial hydroxyapatite, *Tribol. Int.* 63, 2013.

- [31] H.Y. Yu, Z.B. Cai, Z.R. Zhou, M.H. Zhu, Fretting behavior of cortical bone against titanium and its alloy, *Wear*, 2005.
- [32] <https://dental-art.hr/savjeti/sto-su-zubni-implantati/> , pristupljeno 15.9.2020.
- [33] <http://stomatolog-brncic.hr/keramicki-implantati/> , pristupljeno 15.9.2020.
- [34] E. Sajewicz, Effect of saliva viscosity on tribological behaviour of tooth enamel, *Tribol. Int.*, 2009.
- [35] N.M. Harvey, G.H. Carpenter, G.B. Proctor, J. Klein, Normal and frictional interactions of purified human statherin adsorbed on molecularly-smooth solid substrata, *Biofouling*, 2011.
- [36] C. Latorre, B. Bhushan, Investigation of scale effects and directionality dependence on friction and adhesion of human hair using AFM and macroscale friction test apparatus, *Ultramicroscopy*, 2006.
- [37] J.R. Smith, J. Tsibouklis, T.G. Nevell, AFM Friction and adhesion mapping of the substructures of human hair cuticles, *Appl. Surf. Sci.*, 2013.
- [38] A.C. Dunn, J.A. Tichy, J.M. Uruena, W.G. Sawyer, Lubrication regimes in contact lens wear during a blink, *Tribol. Int.*, 2013.
- [39] B. Zhou, Y. Li, N.X. Randall, L. Li, A study of frictional properties of senofilcon—a contact lenses, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 4, 2011.
- [40] Ranteš, Z., *Suvremeni farmaceutski oblici za topikalno liječenje glaukoma*, FBF, Zagreb 2019.
- [41] Ivanić, K.Z., *Menadžment inovacija u bionici*, PMF, Zagreb, 2013.



## **PRILOZI**

I. CD-R disc