



PODSTAWY BIOMECHANIKI

Wykład 7:

**Wybrane zagadnienia biotribologii
Procesy tarcia i smarowania w stawach
Procesy zużycia w stawach**



dr Ewa Polak



Biotribologia

Wiedza o procesach zachodzących w ruchomym styku ciał stałych to **tribologia**.

Jest ona określana jako nauka zajmująca się tarciem, smarowaniem i zużywaniem stykających się powierzchni podczas wzajemnego ruchu (przemieszczania się) ciał stałych. Jest nauką interdyscyplinarną, zawierającą w sobie fizykę, chemię, materiałoznawstwo i termodynamikę.

Węzły tarcia są podstawowymi systemami tribologicznymi w maszynach i urządzeniach.

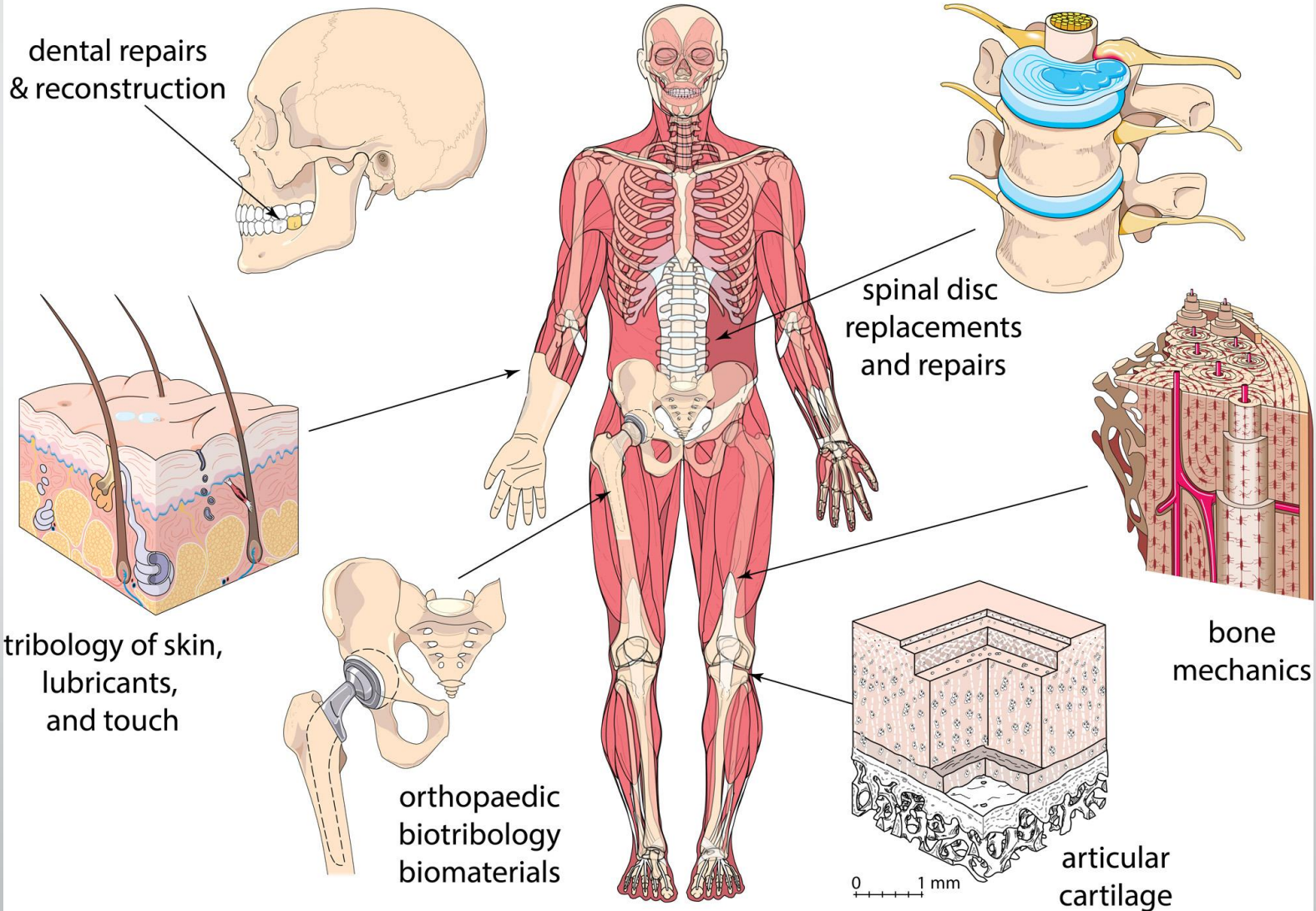
Biotribologia jest gałęzią tribologii, ukierunkowaną na zrozumienie zasad tarcia, smarowania oraz zjawisk zużycia, odnoszących się do stawów synowialnych (maziowych).

Biowęzły tarcia to systemy tribologiczne występujące w organizmach żywych.



Biotribologia

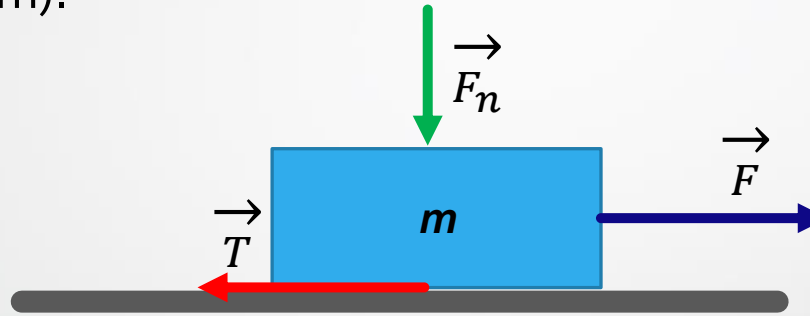
Human Related Tribology





Procesy tarcia w mechanice

Tarcie to zjawisko powstawania siły hamującej (siły oporu), na styku dwóch ciał. Jest też definiowane jako opór w ruchu między dwoma ciałami będącymi w kontakcie. Jeżeli stykające się ze sobą ciała nie są względem siebie w ruchu to mówimy o **tarciu statycznym** (spoczynkowym), w przeciwnym wypadku mamy do czynienia z **tarciem kinetycznym** (dynamicznym).



W pierwszym przypadku siła tarcia jest co do wartości równa sile, jaką trzeba przyłożyć do jednego z ciał, by zaczęło się ono poruszać. Natomiast w drugim przypadku tarcie jest równe co do wartości sile potrzebnej do utrzymania ciała w ruchu ze stałą prędkością.

Siły tarcia wyrażają się następującymi wzorami:

$$T_s = \mu_s \times F_n \quad \text{lub} \quad T_k = \mu_k \times F_n$$

gdzie: μ_s i μ_k [mi] – współczynniki tarcia odpowiednio statycznego i kinetycznego (oznaczany też jako k lub f), F_n – siła naciskająca (siła normalna).



Procesy tarcia w mechanice

Współczynniki tarcia są wielkościami bezwymiarowymi i charakteryzują one stykające się ze sobą powierzchnie. Wartość tych współczynników zależy m.in. od stopnia chropowatości ciał (współczynnik tarcia dla lodu będzie mniejszy niż dla papieru ściernego).

Siła naciskająca jest siłą skierowaną prostopadle do siły tarcia, często jest ona nazywana **siłą normalną**, gdyż działa wzdłuż prostej prostopadłej do granicy styku dwóch ciał (równoważy siłę reakcji podłoża).

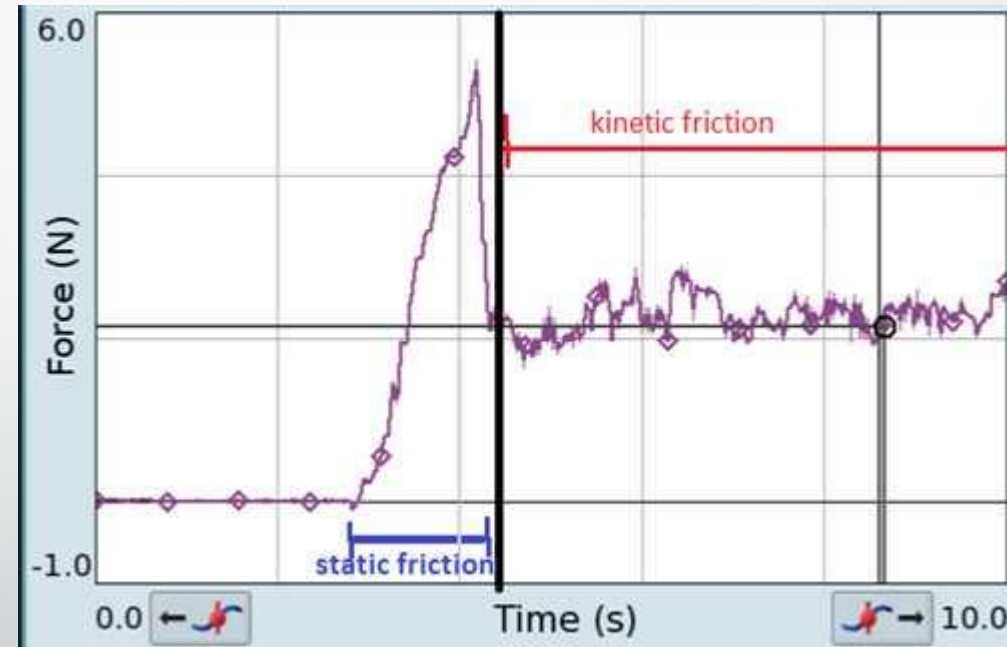
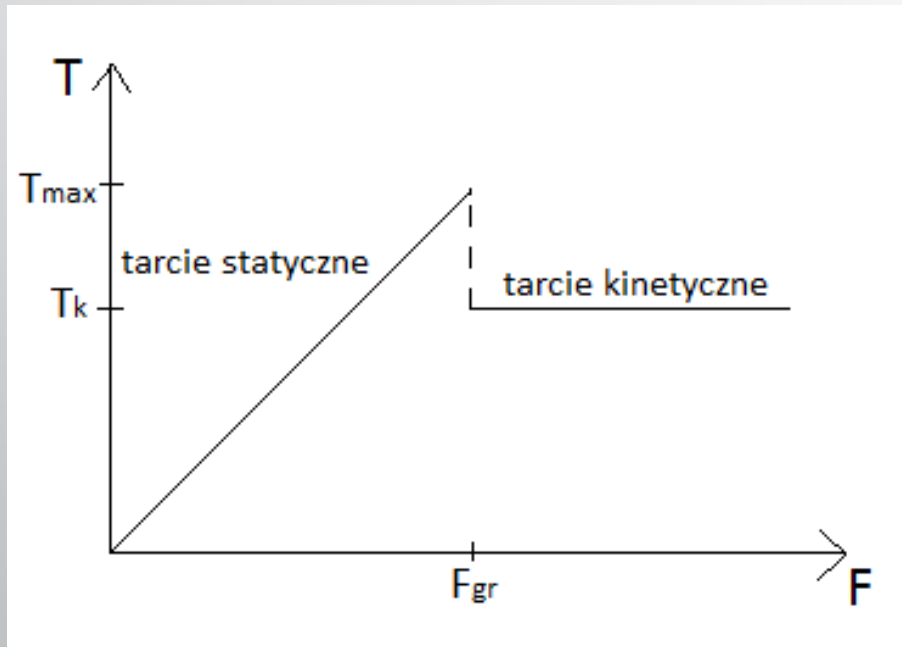
Do określenia dynamicznych i energetycznych skutków tarcia służą następujące wielkości:

- siła tarcia F_t
- moment tarcia M_t
- współczynnik tarcia $\mu = F_t/F_n$ (gdzie F_n jest siłą normalną skierowaną prostopadle do powierzchni)
- ciepło tarcia q_t
- temperatura tarcia T_t



Procesy tarcia w mechanice

Siła niezbędna do wywołania ruchu (tj. pokonania tarcia statycznego) jest większa niż siła niezbędna do kontynuowania ruchu (tj. do pokonania tarcia kinetycznego). Zatem współczynnik tarcia kinetycznego (μ_k) jest niższy niż współczynnik tarcia statycznego (μ_s).





Procesy tarcia w mechanice

Tarcie jest jednym z podstawowych procesów zachodzących w maszynach mechanicznych i może być zjawiskiem negatywnym, powodującym zużywanie się materiałów, a w konsekwencji utratę właściwości użytkowych elementów maszyn i urządzeń.

Różne rodzaje tarcia wymagają różnych warunków smarowania. Źle dobrany środek smarny może niewłaściwie wpływać na niezawodność urządzenia i jego pracę.

Czynnikami istotnie wpływającymi na zużycie ściernie współpracujących powierzchni skojarzenia trącego są:

- lepkość środka smarnego,
- grubość filmu smarującego,
- prędkość przemieszczania współpracujących powierzchni trących,
- chropowatość powierzchni,
- obciążenie.

Podstawowymi środkami smarnymi stosowanymi do smarowania skojarzeń trących maszyn są oleje smarne, smary plastyczne i smary stałe. Oprócz zmniejszania tarcia środki smarne utrzymują odpowiednią temperaturę, ograniczają zużycie, korozję czy zanieczyszczenia, a także przenoszą moc.



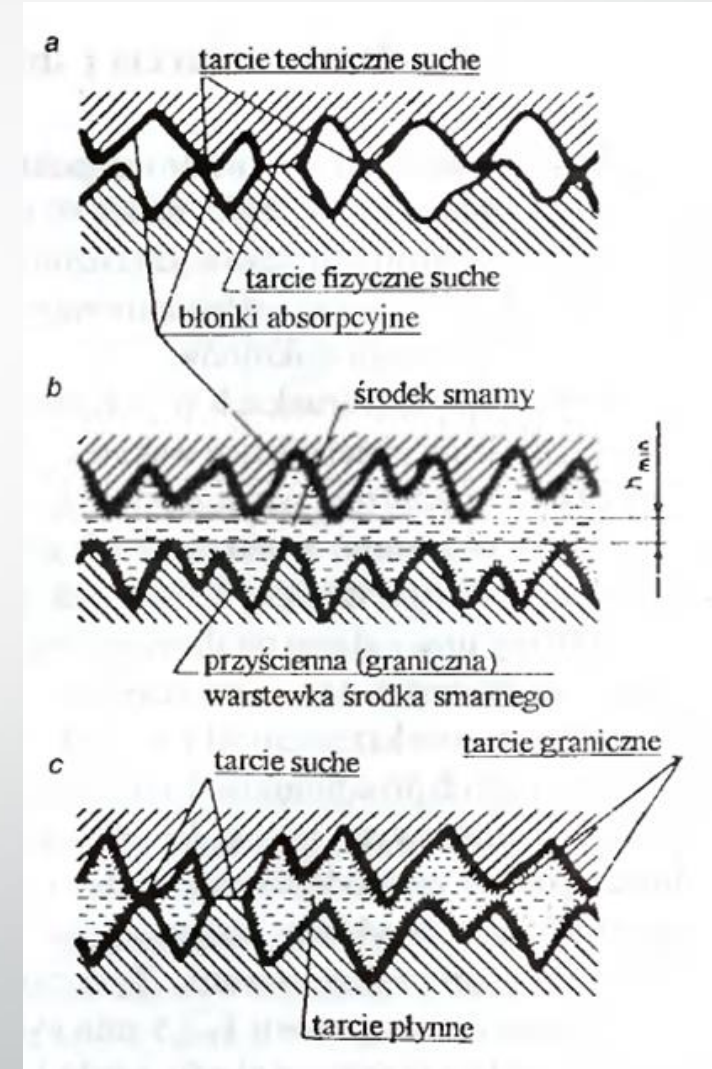
Rodzaje tarcia

Ze względu na styk powierzchni wyróżnia się trzy rodzaje tarcia:

Tarcie suche (a) zachodzi w warstwach wierzchnich niesmarowanych ciał, przemieszczających się względem siebie. Ze względu na budowę tkanek praktycznie nie występuje w żywym organizmie.

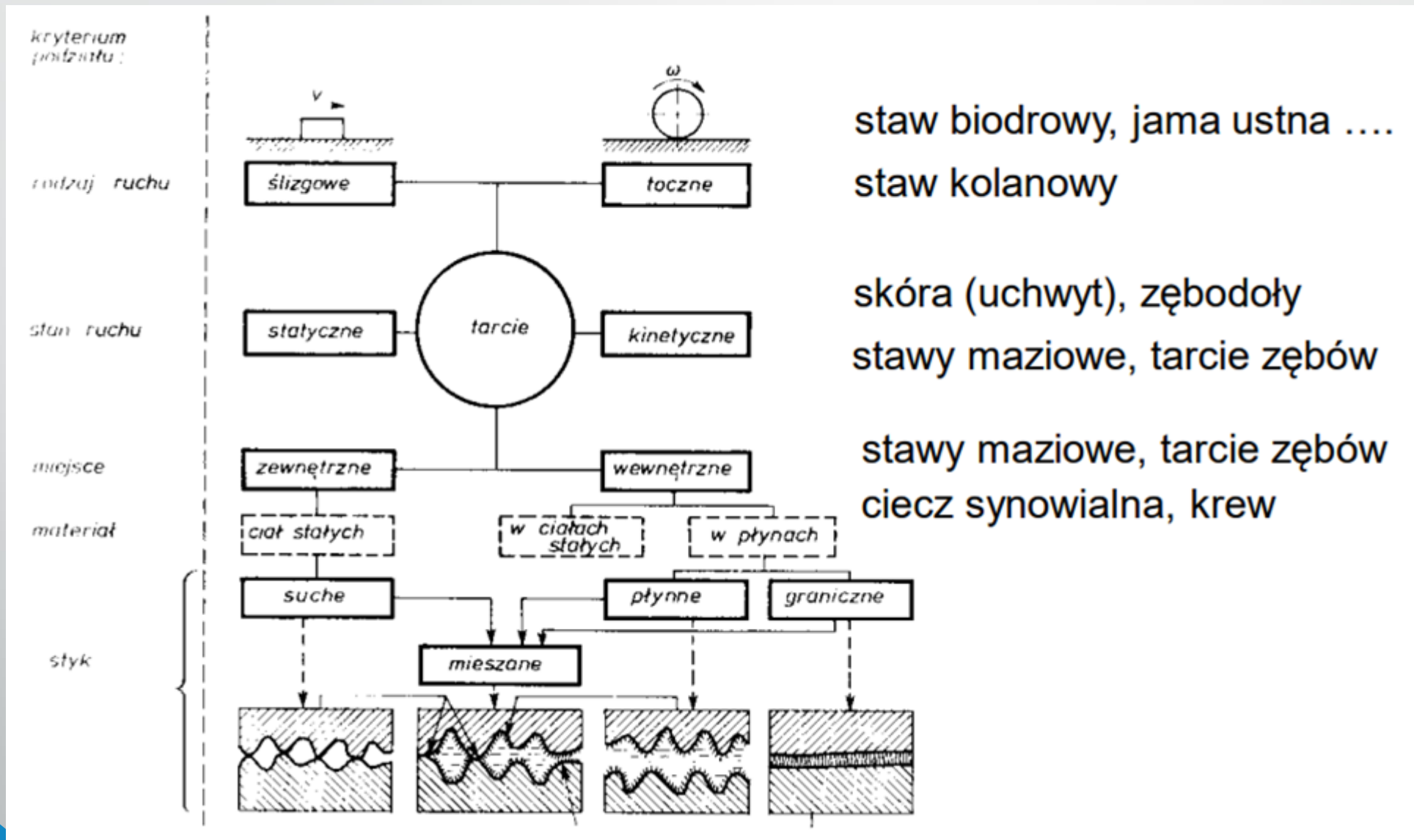
Tarcie płynne (b) zachodzi wtedy, gdy trące się ciała są całkowicie rozdzielone warstewką płynu.

Tarcie mieszane (c) zachodzi jeśli smarowanie nie zapewnia całkowitego oddzielenia powierzchni przemieszczających się względem siebie.



Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997

Rodzaje i obszary tarcia w organizmach żywych

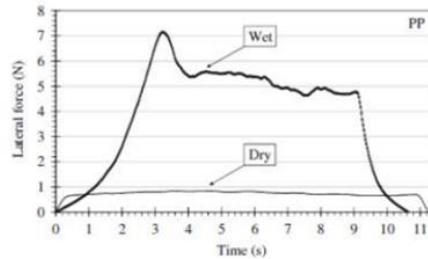
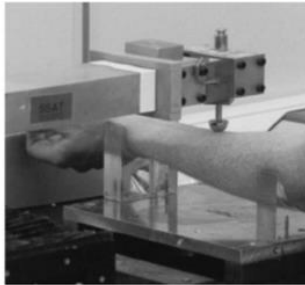




Rodzaje i obszary tarcia w organizmach żywych

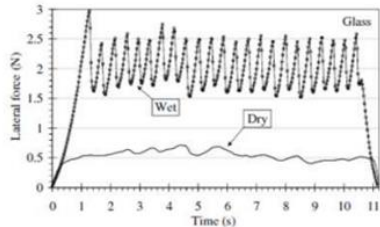
W porównaniu z gładką skórą, linie papilarne o 30% zmniejszają powierzchnię styku, co redukuje tarcie.

Tarcie skóry



Zmiana siły tarcia szkła i PP po skórze (na sucho i na mokro)

$R=20\text{ mm}$, $F_n=2\text{ N}$, $v_s=8\text{ mm/s}$



Tarcie zębów

Wklinowanie - więzozrost, połączenie między korzeniem zęba i ścianką zębodołu u ssaków.

Tarcie statyczne

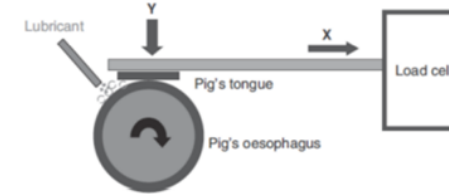
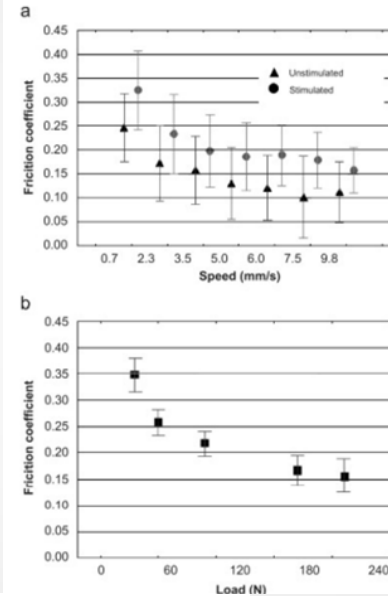


Żucie, zgrzytanie - tarcie pomiędzy powierzchniami żującymi (szkliwo) zębów.

Tarcie kinetyczne



Tarcie w przełyku

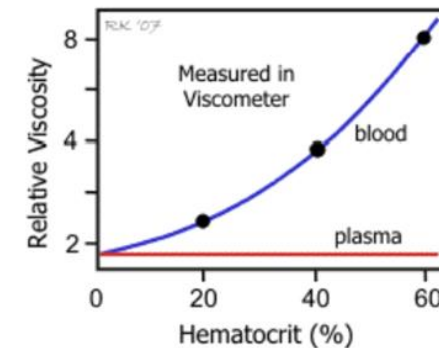


Charakterystyka zmian współczynnika tarcia błony śluzowej, w zależności od parametrów ruchowych.

Tarcie wewnętrzne krwi

Lepkość krwi zależy od lepkości osocza, i ilości elementów morfotycznych (głównie czerwonych krwinek).

- Osocze wykazuje właściwości cieczy newtonowskiej, ale krew nie.
- Lepkość krwi (przy prędkości ścinania 100 sec^{-1}) jest około pięć razy większa od lepkości wody.
- Przy dużym wzroście ilości czerwonych krwinek (czerwieńca), lepkość krwi może być 10-krotnie większa niż lepkość wody.



Szklivo jest najtwardszą tkanką organizmu. Pełni funkcję ochronną przed skutkami tarcia, czynnikami biologicznymi oraz chemicznymi.



Stawy synowialne

Stawy synowialne (maziowe, wolne) są najbardziej ruchomym połączeniem pomiędzy kośćmi.

Stałe składowe stawu:

- chrząstka stawowa pokrywająca powierzchnie stawowe
- torebka stawowa składająca się z warstwy zewnętrznej włóknistej i warstwy wewnętrznej maziowej, która wydziela lepłą substancję zwaną mazią stawową,
- jama stawowa

Niestałe składowe stawu:

- więzadła stawowe zbudowane z tkanki łącznej włóknistej
- obrąbek stawowy - wał chrząstki włóknistej, np. w stawie barkowym powoduje pogłębienie panewki, chroni główkę przed uderzeniem
- krążki stawowe zbudowane z chrząstki włóknistej
- łąkotki stawowe
- kaletki maziowe



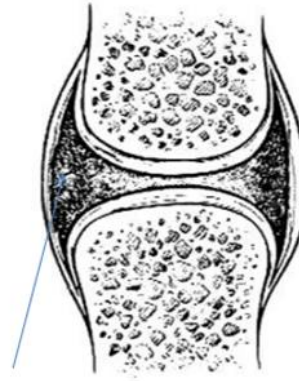
Stawy synowialne

A

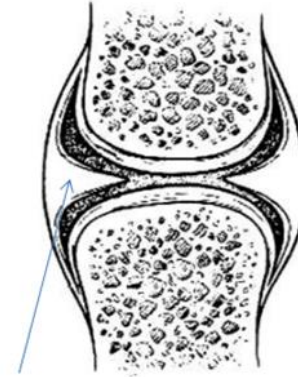


B

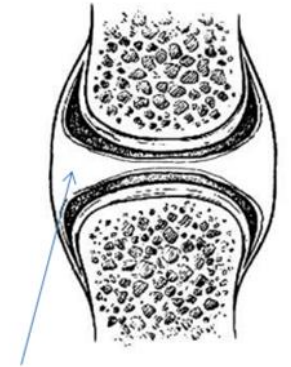
Ze względu na budowę stawy można podzielić na:
staw maziówkowy staw łąkotkowy staw z krążkiem stawowym



Kaletka maziowa – rodzaj wytworu błony maziowej, mający postać zbudowanego z tkanki łącznej worka o pęcherzykowatym kształcie.



Łąkotka- elastyczna, zbudowana z tkanki chrzęstnej włóknistej (staw kolanowy)



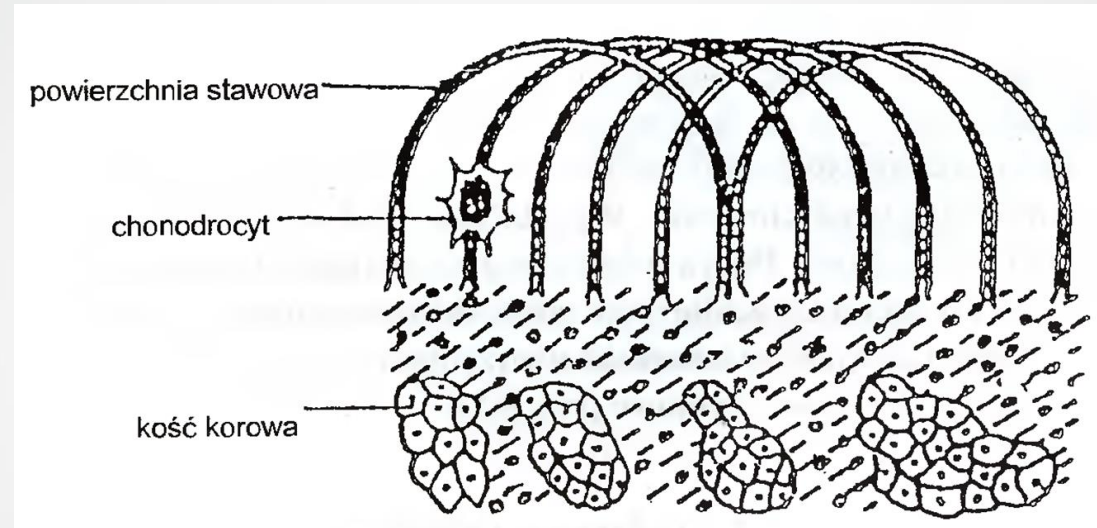
Krążek stawowy - zbudowany ze zbitej tkanki łącznej włóknistej, dopasowuje powierzchnie stawowe, dzieli jamę stawową na dwie komory (staw mostkowo-obojczykowy).

Schemat budowy (A) i rodzaje stawów synowialnych (B).

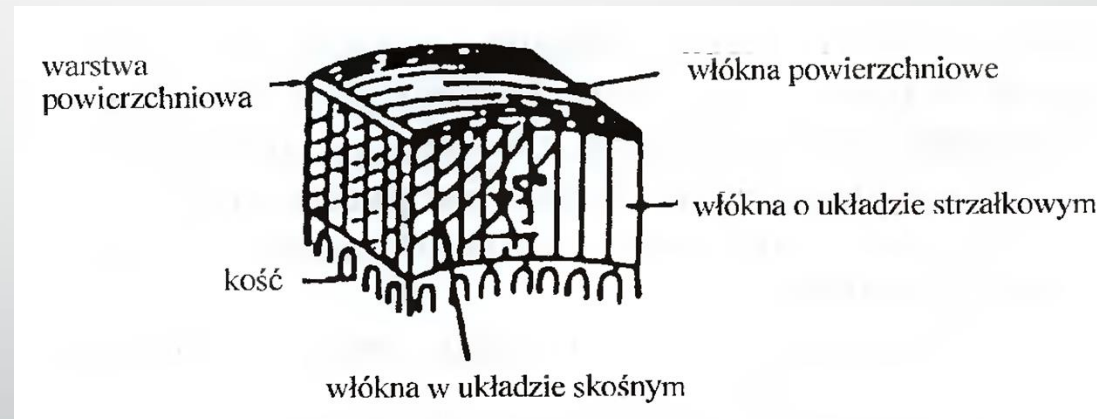


Chrząstka stawowa

Arkadowa budowa:



Układ włókien kolagenowych:

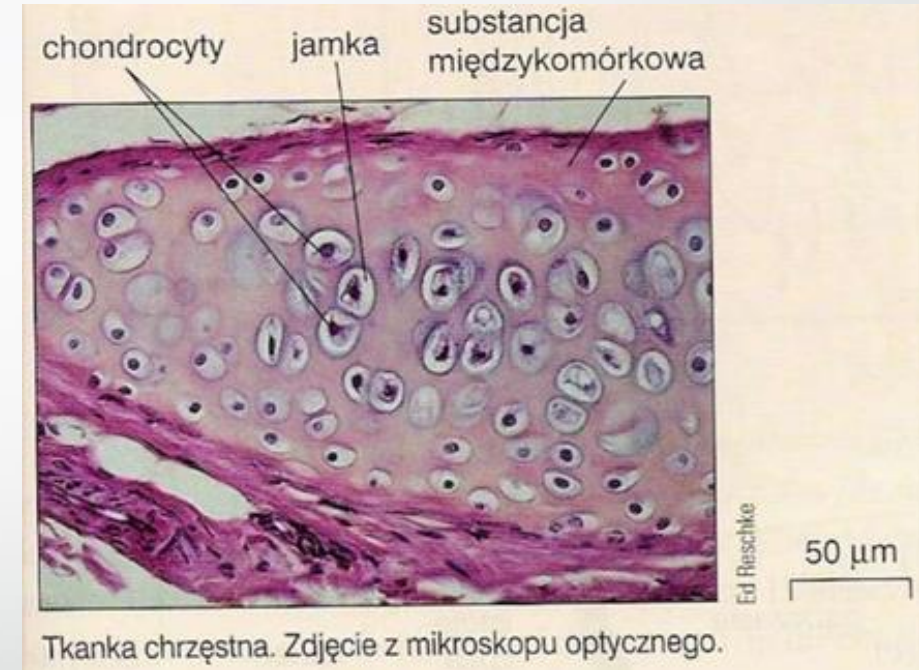
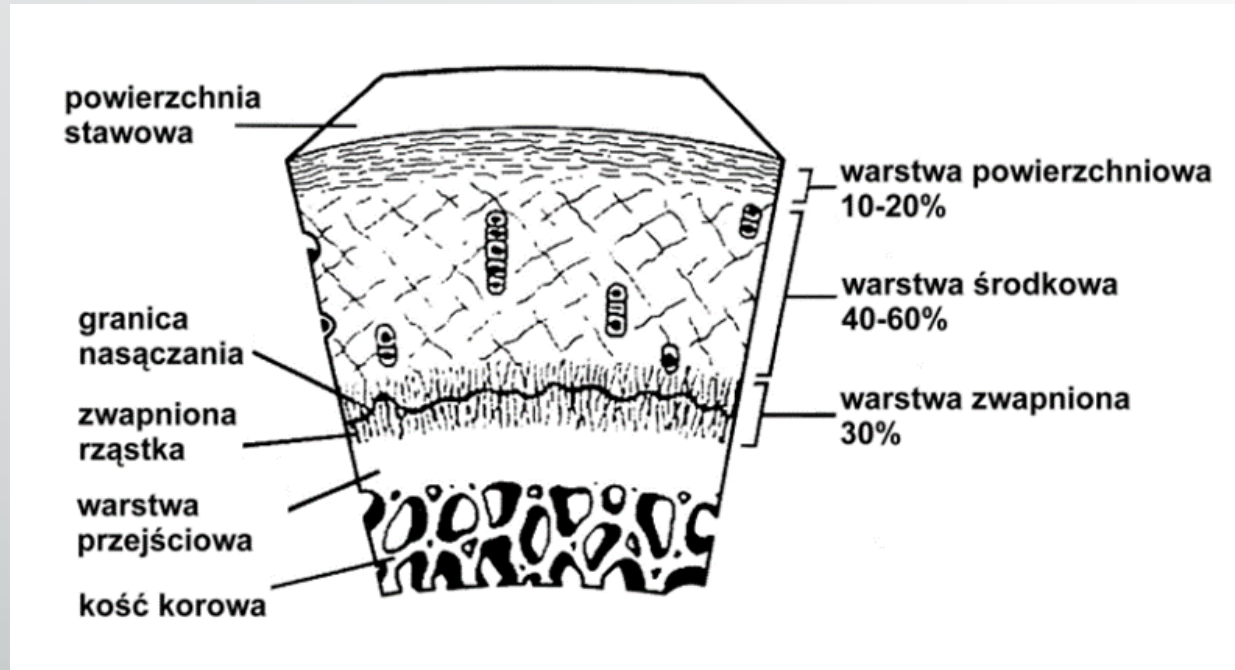


Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997



Chrząstka stawowa

Budowa chrząstki stawowej:



Substancja międzykomórkowa spełnia rolę wypełniacza, współtworzy strukturę nadając jej mechaniczne właściwości. Ponadto jest ona środowiskiem, poprzez które odbywa się transport substancji odżywiających komórki chrzęstne.



Chrzątka stawowa

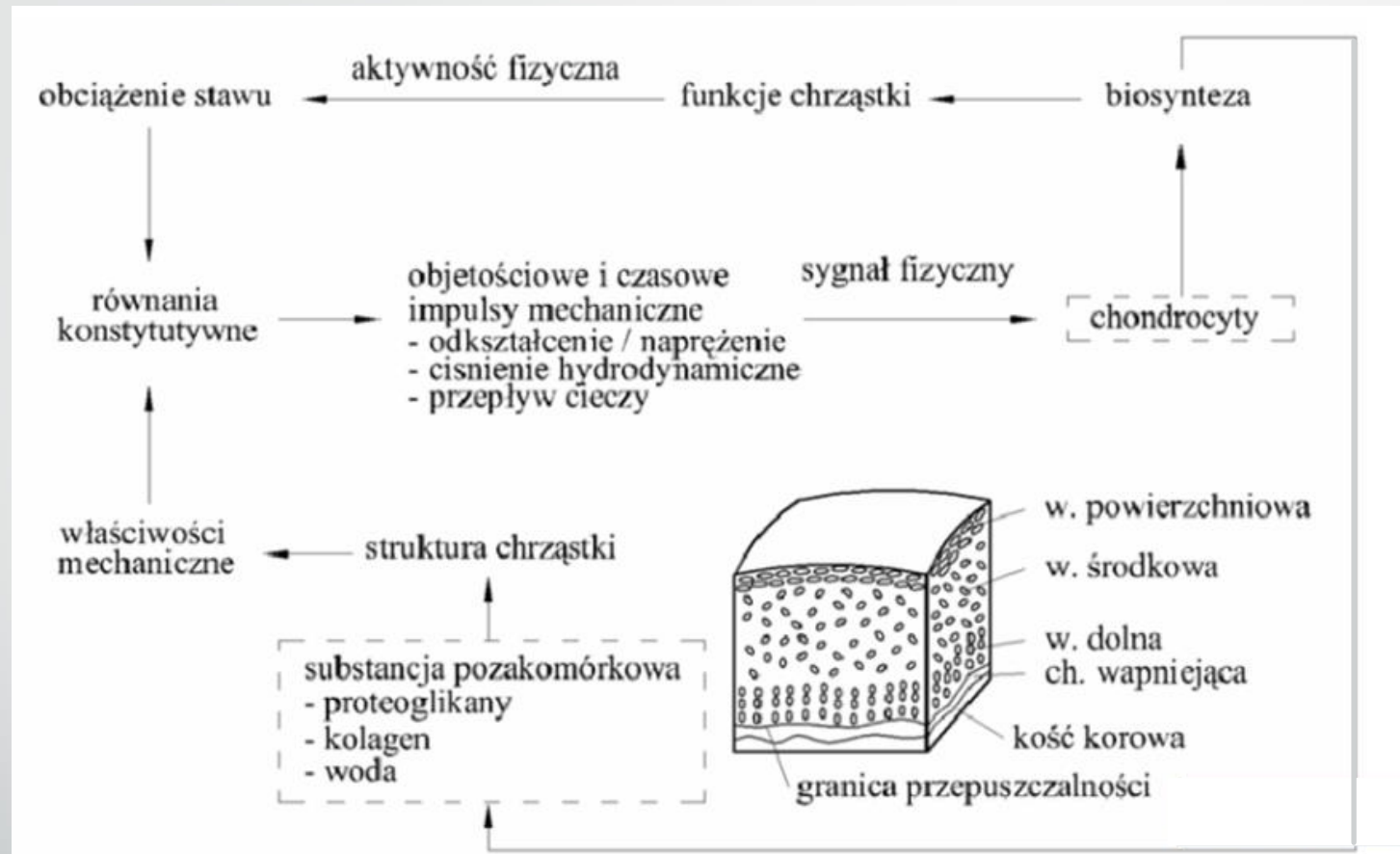
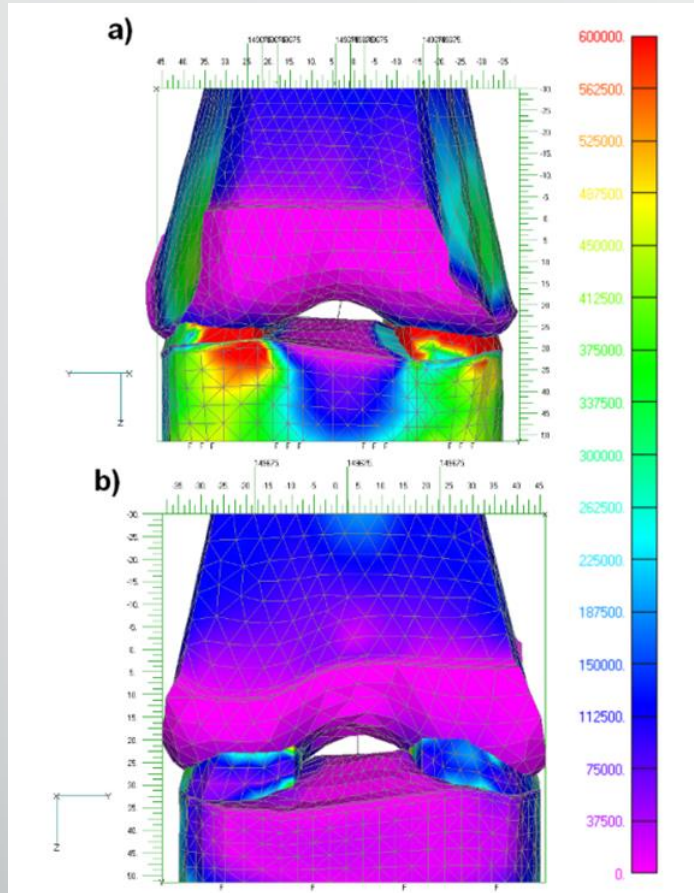


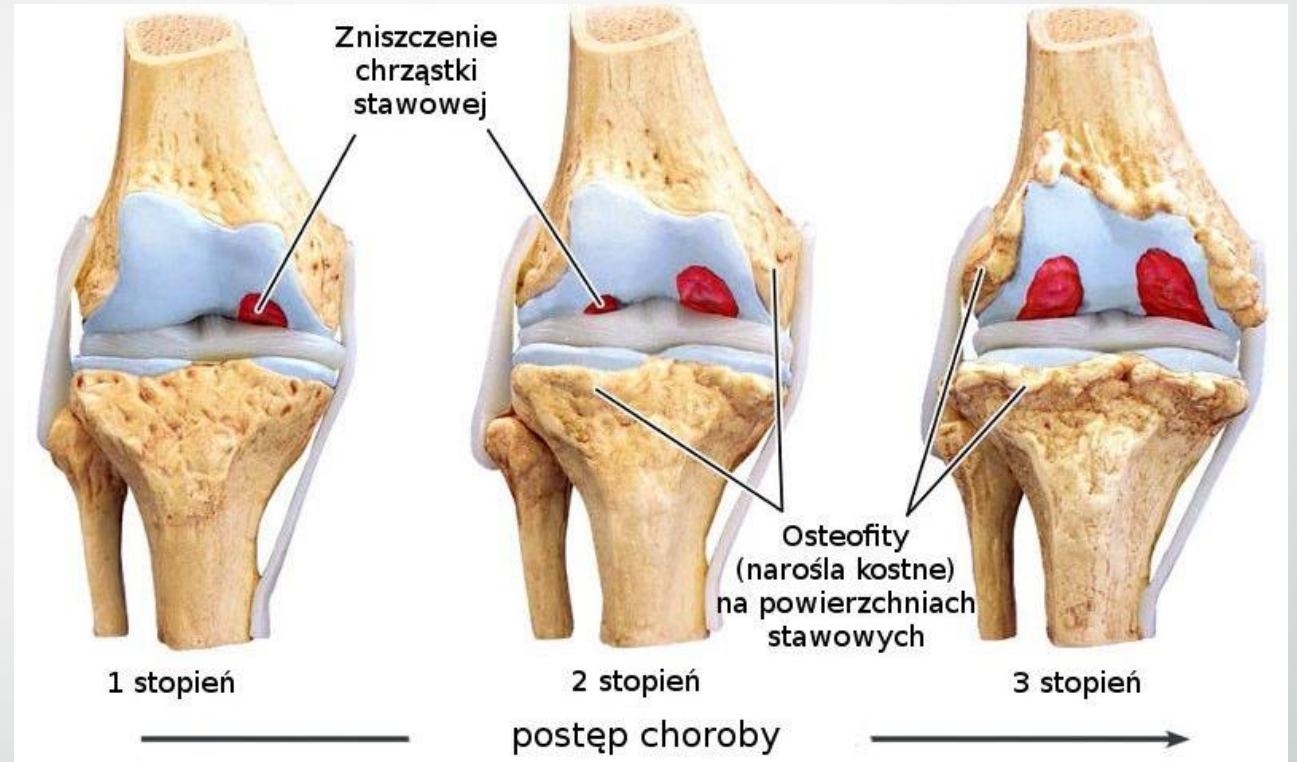
Diagram dystrybucji chondrocytów w trzech strefach chrząstki stawowej, i relacji pomiędzy kompozycją struktury, sygnałami mechanicznymi i ich aktywnością biosyntetyczną.



Chrzątka stawowa



Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu prawidłowego stawu kolanowego. Kolano w pozycji wyprostnej: a) widok z przodu, b) widok z tyłu.



Stopień zwyrodnienia stawu kolanowego (artrozy)

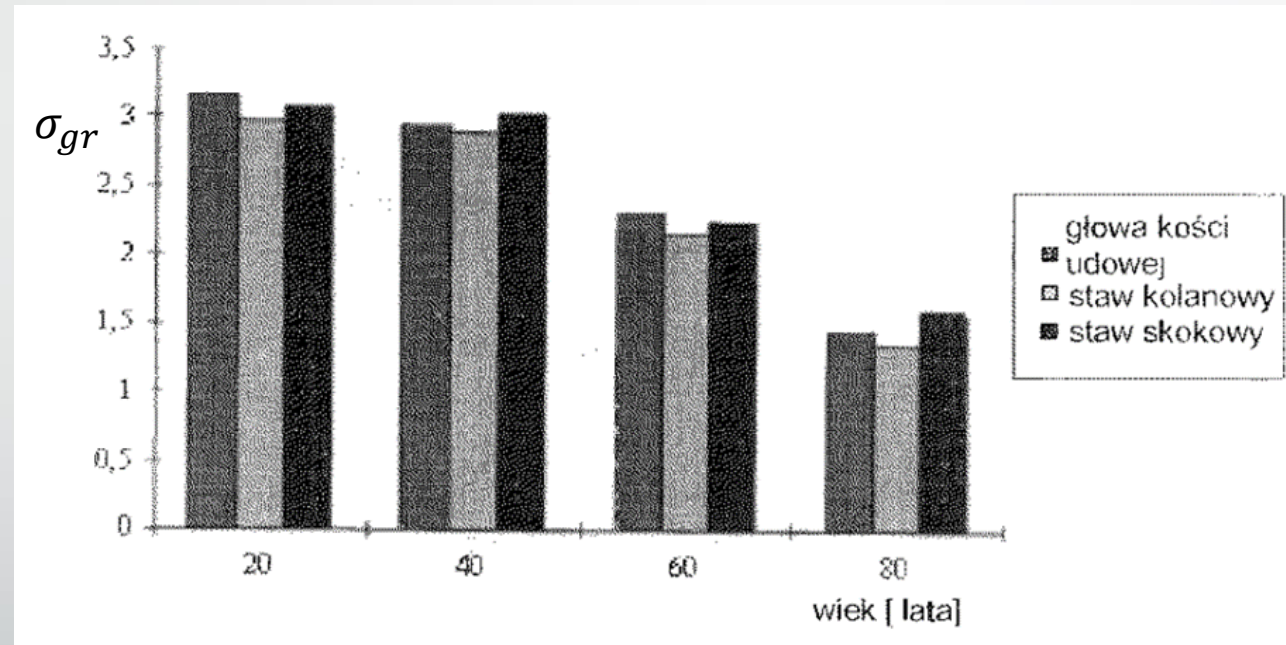
Źródło: Ryniewicz A.M., Ryniewicz A., *Analiza mechanizmu smarowania stawów człowieka w badaniach in vitro oraz in vivo. Przegląd elektrotechniczny, Nr 5/2014, s. 142-145.*



Chrzątka stawowa

Chrzątka stawowa ma zwykle grubość 0,5–2 mm, chociaż jej warstwa może dochodzić nawet do 6 mm grubości (np. powierzchnia wewnętrzna rzepki). Z wiekiem ulega zużyciu.

Zmiany wytrzymałości granicznej [σ_{gr} (sigma) – naprężenie graniczne] zdrowej chrząstki stawowej w zależności od wieku – próbki pobrano z głowy kości udowej, stawu kolanowego, stawu skokowego:



Chrząstki stawowe panewek są zazwyczaj bardziej miękkie niż główek stawowych, dlatego istnieje możliwość lepszego dopasowania powierzchni stawowych.



Ciecz synowialna – maź stawowa

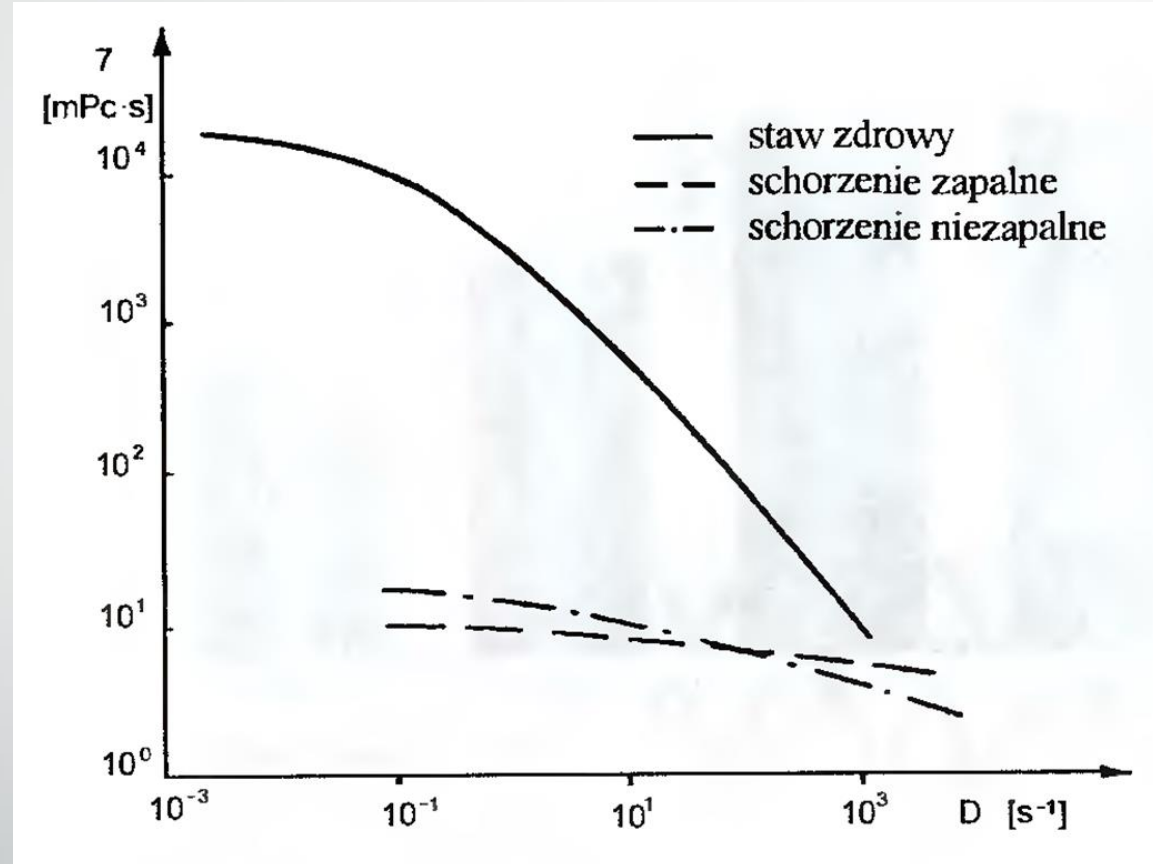
Substancją smarującą w stawach jest **ciecz synowialna** zwana również **mazią stawową** (**synovią**). Jest ona bezbarwnym produktem błony maziowej, której zasadniczym celem jest jej ochrona i odżywianie. O lepkości mazi stawowej decyduje zawartość mucyny (kwas hialuronowy). Kwas ten w roztworze większym niż 1% przechodzi w stan żelu. Inne składniki mazi stawowej są dializatami osocza krwi.

Ciecz synowialna jest wielofazową cieczą nienewtonowską o dużej lepkości. Składa się ona z fazy wodnistej, w której znajdują się duże cząsteczki kwasu hialuronowego. Faza wodnista, będąca dializatem plazmy krwi, może być stosunkowo łatwo wciśnięta w porowatą chrząstkę, podczas gdy znacznie większe cząstki kwasu hialuronowego pozostają w szczelinie smarowej. Zagęszczenie tych cząsteczek wzrasta, co jest połączone ze znacznym wzrostem lepkości tego, przyjmującego z czasem postać żelu, koncentratu. W rezultacie smarowanie, powodujące tarcie płynne stosunkowo szybko przechodzi w bardzo skąpe smarowanie, w którym rolę środka smarowego pełnią jedynie cząsteczki kwasu hialuronowego. Wynikiem tego stanu rzeczy jest tarcie mieszane.



Ciecz synowialna – maź stawowa

Zmiany lepkości cieczy synowialnej w funkcji prędkości ścinania:



Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997



Procesy tarcia i smarowania w stawach

W zdrowych stawach synowialnych pokryta chrząstką głowa kości jest oddzielona od chrzęstnej części drugiej kości synowią (mazią stawową).

Od strony tribologii i mechaniki tak przedstawione smarowanie stawu jest rozumiane jako tarcie płynne: dwie współpracujące powierzchnie kości stawu są oddzielone warstwą cieczy synowialnej o grubości od kilkunastu do kilkudziesięciu mikronów.

W ekstremalnych warunkach w połączeniach stawów maziowych mogą występować tarcie mieszane, zachodzące w skutek przerywania warstewki nośnej cieczy synowialnej i tarcie graniczne, gdy nie powstaje warstewka nośna tej cieczy i smarowanie odbywa się jej resztkami, w warstewkach grubości kilku cząstek. Są to jednak warunki ekstremalne, trwające na ogół krótko.



Procesy tarcia i smarowania w stawach

Jak podaje literatura przedmiotu, w przypadku stawu biodrowego wystarczają tylko **4 godziny pracy** stawu bez cieczy synowialnej, aby **chrząstka stawowa starła się do kości**.

Ma to szczególne znaczenie dla ruchu stawu podczas chodu, połączonego ze zwiększeniem sił występujących w stawie, np. podczas noszenia przez człowieka ciężkich przedmiotów. Efektem może być pogarszający się proces smarowania w stawie biodrowym, co z kolei intensyfikuje bardzo szybko procesy zużycia, powodujące zmiany zwyrodnieniowe w stawie.

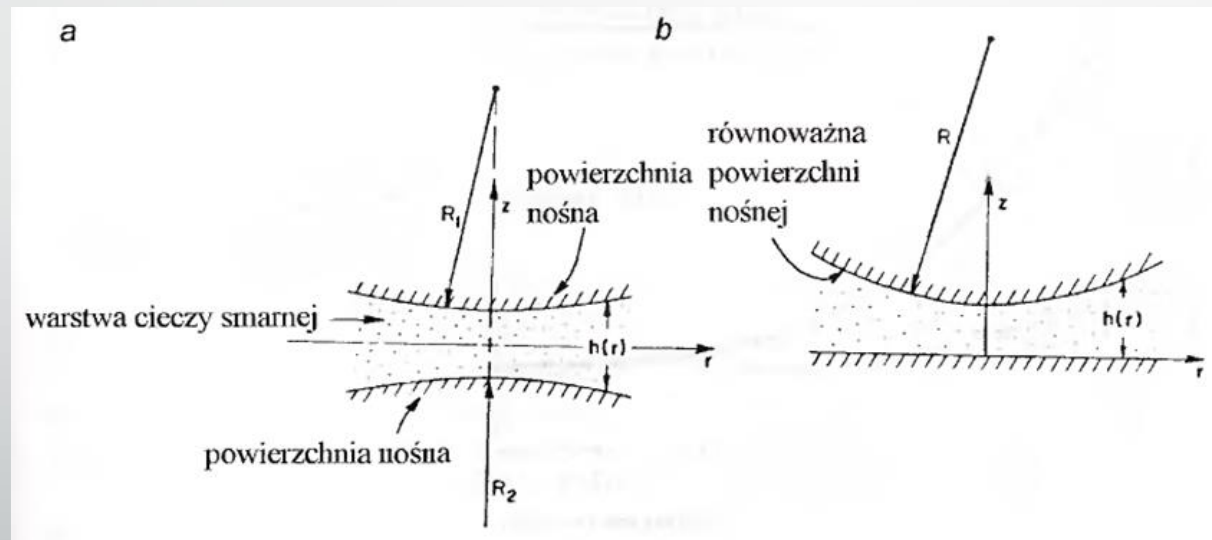
Przedstawione przykłady wskazują jak ważną rolę w należyтым funkcjonowaniu stawu odgrywa proces smarowania. Tym bardziej, jeśli się zważy, że np. na staw biodrowy przypada w ciągu roku 1-2,5 mln cykli obciążeń zmiennych, podczas których podczas normalnej prędkości chodu, rzędu 1,5 m/s, prędkość wzajemnego ślizgania się powierzchni w tym stawie wynosi 5-10 cm/s.



Procesy tarcia i smarowania w stawach

W maziowych połączeniach stawowych mamy do czynienia ze **smarowaniem hydrodynamicznym**. Smarowanie to polega na swoistym wytworzeniu wyporu hydrodynamicznego płynu w szczelinie smarnej dzięki:

- klinowo zwężającej się szczelinie (w kierunku ruchu),
- ruchowi względnemu trących się ciał,
- lepkości środka smarnego i jego przyczepności do powierzchni przemieszczających się ciał.



Powierzchnie nośne połączeń stawowych, rozdzielanych cienką warstwą cieczy smarnej (synovia). Budowa geometryczna błony olejowej jest opisana przez $h(r)$ oraz dwa promienie krzywizn – R_1 i R_2

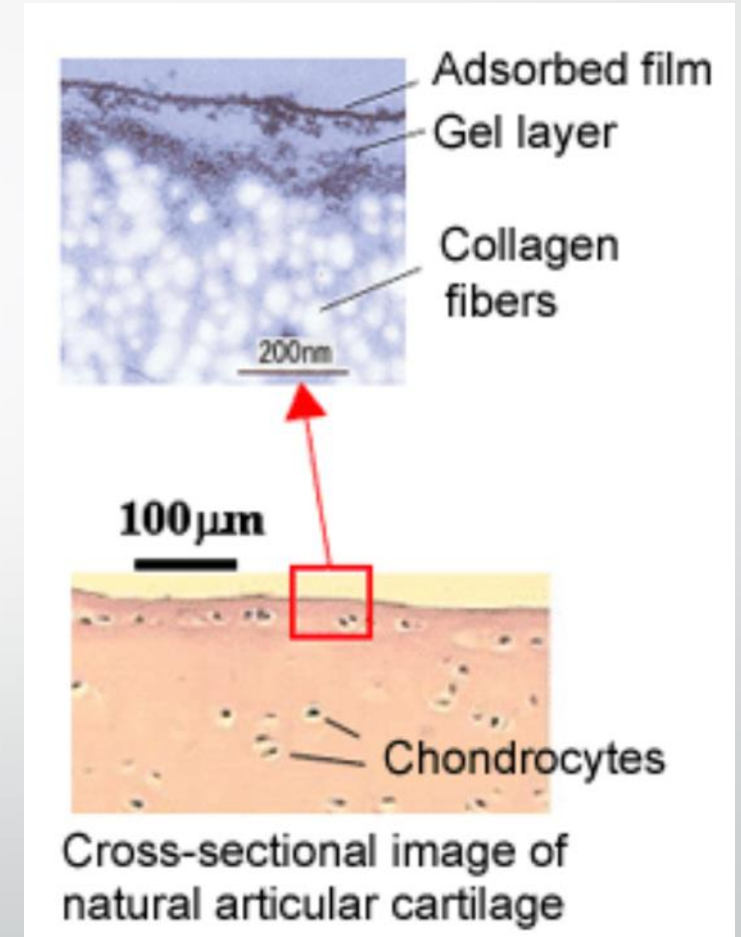


Procesy tarcia i smarowania w stawach

Według najczęściej cytowanej teorii, smarowanie stawu polega na wyciskaniu, w obszarze szczeliny smarowej, cieczy synowialnej z chrząstki stawowej.

W czasie obciążania stawu (pod wpływem nacisku główki na panewkę stawu) następuje wciskanie do chrząstki mniejszych molekuł z cieczy synowialnej, większe pozostają na powierzchni tworząc warstwę graniczną. Ciecz synowialna jest wyciskana z chrząstki tylko w strefie obciążonej. Poza tą strefą, ciecz ta, dzięki zjawiskom kapilarnym, wnika z powrotem do chrząstki.

Dzięki temu mechanizmowi nawet niezbyt dobrze dopasowane elementy stawu pełnią dobrze swoją funkcję.



Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997



Procesy tarcia i smarowania w stawach

Współczynniki tarcia stawów synowialnych różnią się w dość znacznym zakresie w zależności zarówno od rodzaju połączeń stawowych, ich obciążeń, jak i stanu zdrowotnego.

Zestawienie wartości współczynników tarcia występujących w stawach człowieka:

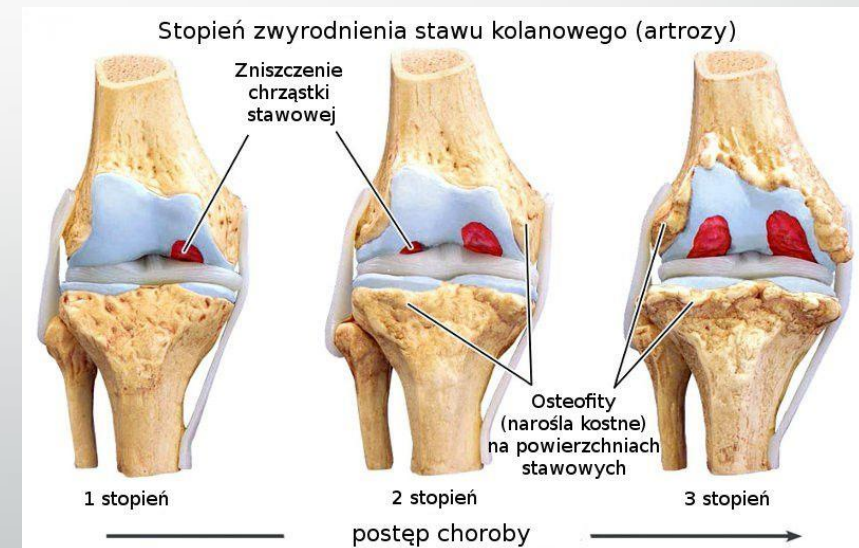
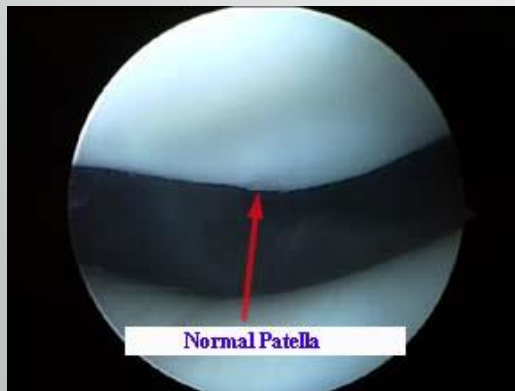
Macierz problemowa zagadnień biotribologii						
Narząd ruchu człowieka	Rodzaj tarcia	Zasada uzyskiwania siły nośnej	Kształt powierzchni kostnych	Przewidywany współczynnik tarcia	Wysokość warstwy smarującej, m	
Staw biodrowy	zdrowy	Płynne	Wyciskanie i hydrodynamika	Sferyczny regularny	$0,0025 \div 0,0030$	$50 \cdot 10^{-6}$
	chory	Graniczne		Pseudosferyczny	$0,015 \div 0,025$	$5 \cdot 10^{-6}$
		Suche	nie ma		0,025	Brak
Staw ramienny	zdrowy	Płynne	Wyciskanie lub hydrodynamika	Sferyczny regularny	$0,0021 \div 0,0030$	$40 \cdot 10^{-6}$
	chory	Graniczne		Pseudosferyczny	$0,015 \div 0,020$	$3 \cdot 10^{-6}$
		Suche	nie ma		0,03	Brak
Staw łokciowy	zdrowy	Płynne	Wyciskanie i hydrodynamika	Paraboliczny regularny	$0,0029 \div 0,0031$	$30 \cdot 10^{-6}$
	chory	Graniczne		Pseudoparaboliczny	$0,01 \div 0,02$	$3 \cdot 10^{-6}$
		Suche	nie ma		$0,03-0,04$	Brak
Staw paliczkowy	zdrowy	Płynne	Wyciskanie i hydrodynamika	Paraboliczny regularny	$0,0029 \div 0,0035$	$10 \cdot 10^{-6}$
	chory	Graniczne		Pseudoparaboliczny	$0,01 \div 0,03$	$2 \cdot 10^{-6}$
		Suche	nie ma		0,04	Brak
Staw kolanowy	zdrowy	Płynne	Wyciskanie i hydrodynamika	Hiperboliczny regularny	$0,0028 \div 0,0036$	$30 \cdot 10^{-6}$
	chory	Graniczne		Pseudohiperboliczny	$0,01 \div 0,03$	$5 \cdot 10^{-6}$
		Suche	nie ma		0,04	Brak



Zaburzenia tarcia powierzchni stawowych

Jak wiadomo, wszystkie ciała trące podlegają procesowi zużycia. Dotyczy to również naturalnych zdrowych stawów. W tym wypadku jednak sama natura troszczy się o to, aby spowodowane tarciem ubytki z wierzchniej warstwy chrząstki stawu były kompensowane w sposób ciągły, produkty zużycia zaś resorbowane przez organizm, bez szkody dla niego.

Stan taki może jednak ulec zakłóceniu przez czynniki zewnętrzne i wewnętrzne, co w konsekwencji prowadzi do nieodwracalnych zmian zwyrodnieniowych w stawie. Występują wówczas przyspieszone procesy zużycia elementów ciernych stawu. Ich skutkiem może być chondromalacja chrząstki stawowej lub artroza.



Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997



Zaburzenia tarcia powierzchni stawowych

W żywym organizmie zużycie elementów stawów synowialnych należy przede wszystkim odnieść do defektów powierzchni współpracujących o charakterze mechanicznym.

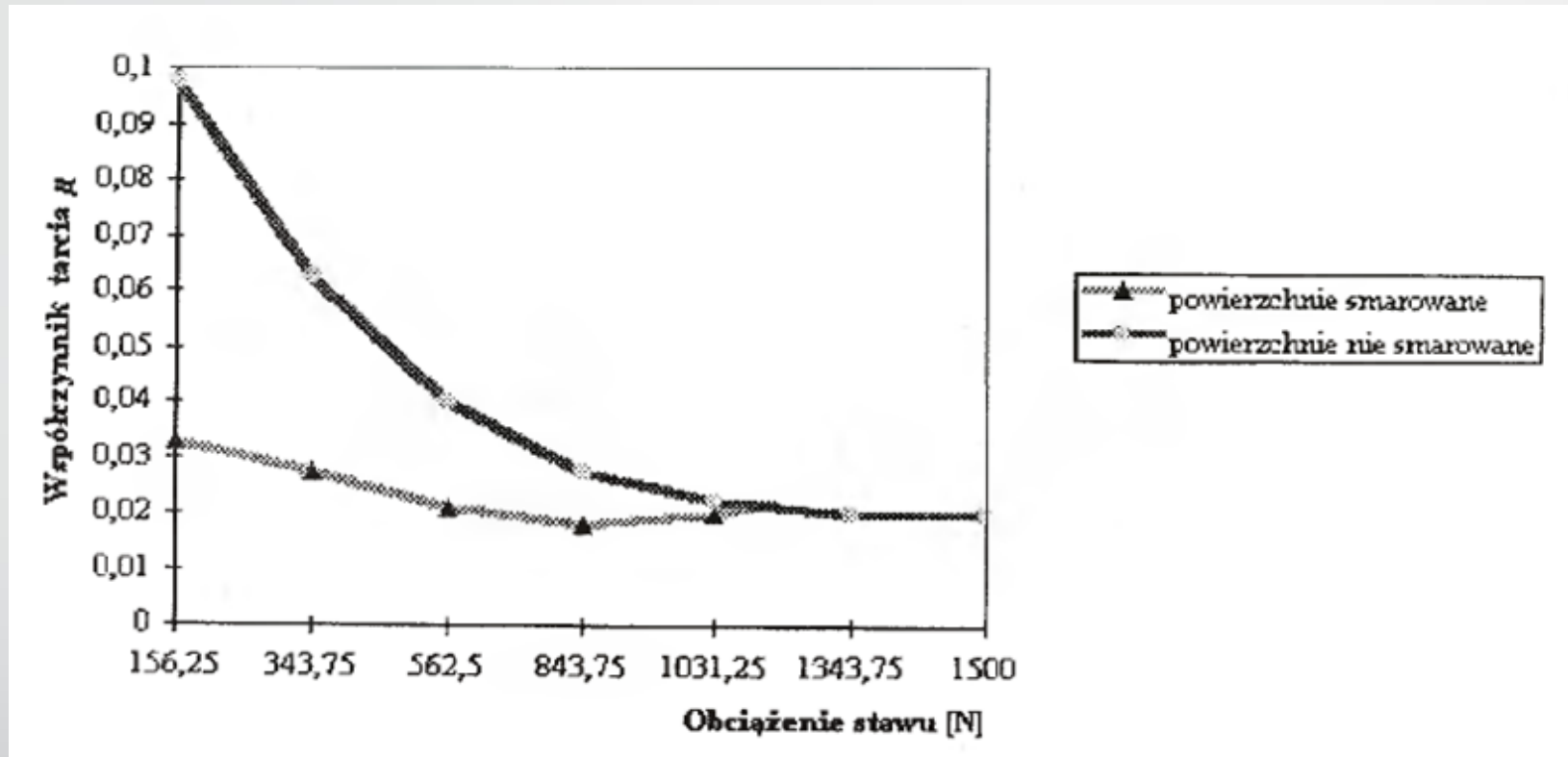
Patomechanizm powstawania tych zmian, a zwłaszcza w artrozach pierwotnych nie jest znany. Aktualne badania wykazują, że wraz ze wzrostem zużycia należy liczyć się ze zwiększeniem obciążenia i pogorszeniem procesu smarowania.

Bardzo trudno jest stwierdzić, jaki proces rozpoczyna zmiany zwyrodnieniowe stawów, w tym także stawów biodrowego oraz kolanowego. Wynika to z tego że, budowa oraz mechanizm działania stawu są o wiele lepiej przystosowane do pełnienia złożonej funkcji, w porównaniu z podobnymi układami mechanicznymi spotykanymi w technice.

Organizm człowieka jest skonstruowany i zaprogramowany w taki sposób, aby sam w sposób ciągły mógł kompensować ubytki warstwy wierzchniej współpracujących stawów spowodowane tarciem, zaś produkty zużycia były resorbowane przez niego. Mimo to stan idealnego radzenia sobie organizmu z procesami tribologicznymi (tarcie, zużycie, produkty zużycia) może ulec zakłóceniu spowodowanemu zarówno czynnikami wewnętrznymi, jak i zewnętrznymi.

Źródło: Będziński R., Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997

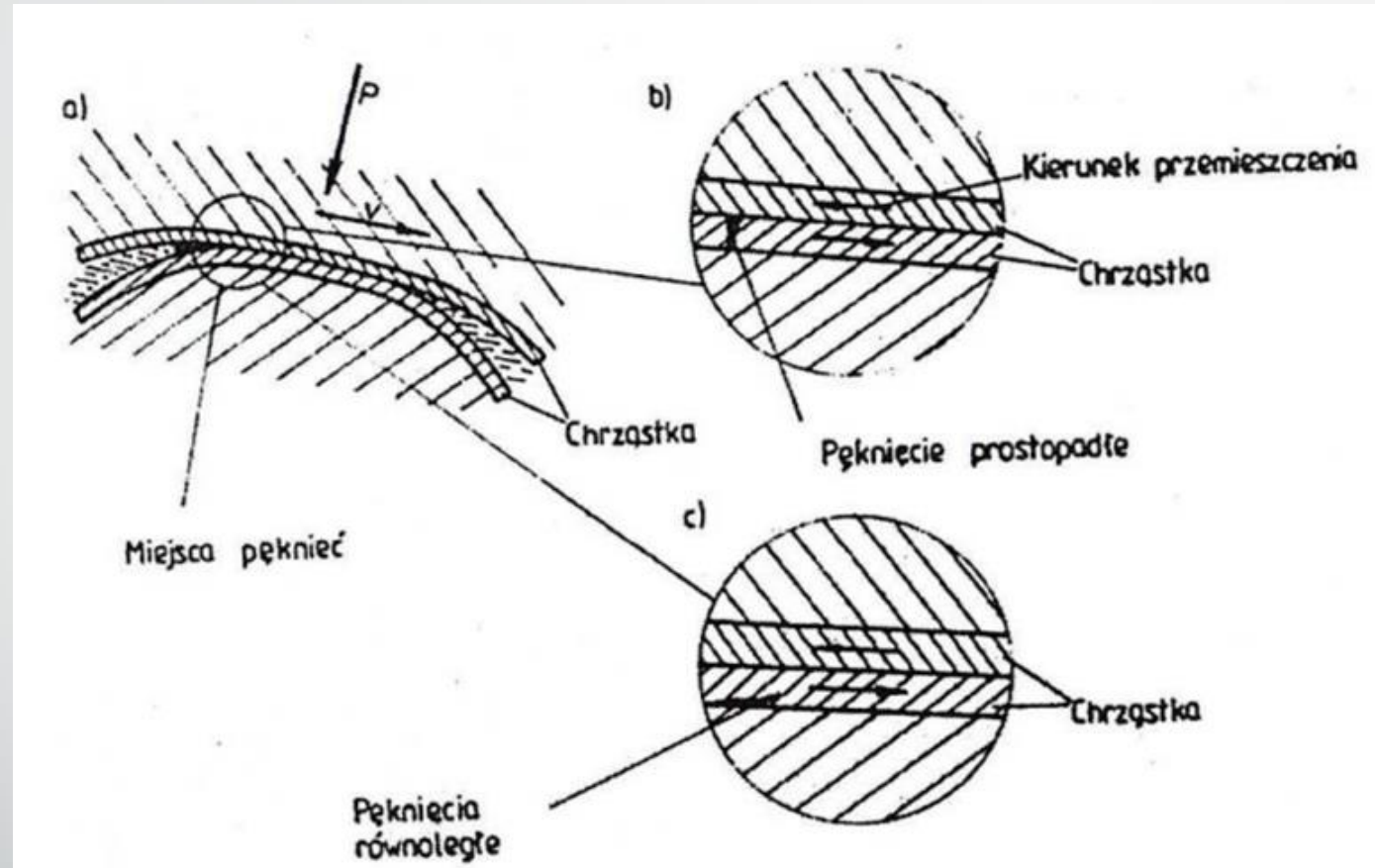
Zaburzenia tarcia powierzchni stawowych



Zmiany współczynnika tarcia μ [mi] między niesmarowanymi a smarowanymi płynem synowialnym powierzchniami w stawie biodrowym pod różnymi obciążeniami.

Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997

Zaburzenia tarcia powierzchni stawowych



Stany przeciążenia stawu z przemieszczeniem:
a), b) powstanie pęknięcia prostopadłego,
c) powstanie pęknięcia równoległego do kości.



Procesy zużycia stawów

Proces zużycia (uszkodzenia) stawów uzależniony jest od :

- czynników geometrycznych: średnica głowy kości udowej (nacisk powierzchniowy i droga poślizgu), kształt i stan powierzchni współpracujących (kulistość i chropowatość);
- czynników materiałowych: obecność cieczy synowialnej jako czynnika smarującego (ilość, jakość, własności mazi stawowej, min. grubość warstwy), biomechaniczne i biotribologiczne własności chrząstek stawowych, wytrzymałość kości;
- czynników fizjologicznych (fizjologia stawu i całego organizmu): ciężar ciała człowieka (obciążenie stawu), stopień aktywności ruchowej (parametry ruchu, sił przyspieszających, prędkości oraz czasu poruszania się), rodzaje wykonywanych ruchów, wiek, stany chorobowe;
- nieprzewidzianych czynników mechanicznych (upadek z wysokości, kolizje samochodowe, inne wypadki).

Źródła: Będziński R., Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997

Burcan J., Cwanek J., Gierzyńska-Dolna M., Korzyński M.: Tribologiczne aspekty smarowania naturalnych stawów człowieka. Tribologia – teoria i praktyka 4(1996), s. 321-337 ²⁹



Procesy zużycia stawów

Podobieństwo stawu biodrowego do przegubu kulistego, pracującego w warunkach tarcia ślizgowego ze smarowaniem, umożliwia określenie przez analogię mechanizmów jego zużycia:

1. **zużycie adhezyjne** – występuje przy małych prędkościach poślizgu, dużych obciążeniach statycznych oraz okresowym bezpośrednim styku współpracujących powierzchni. Może występować na wierzchołkach nierówności chrząstki stawowej, w miejscach, gdzie obciążenie stawu jest maksymalne, a współpracujące powierzchnie zbliżają się do siebie;
2. **zużycie ściernie** – występuje na skutek oddziaływania cząstek stałych (cząstek chrząstki oderwanych od podłoża), znajdujących się w mazi stawowej lub na skutek bezpośredniego styku i wzajemnych przemieszczeń powierzchni fizycznych (o określonej wysokości nierówności);

Źródło: Niemczewska-Wójcik M., Piekoszewski W., Analiza procesów tribologicznych występujących w skojarzeniu panewka–główka endoprotezy stawu biodrowego. Biotrybologia, Nr 6-2015, s. 81-92.



Procesy zużycia stawów

3. **zużycie zmęczeniowe** – występuje podczas obciążeń kontaktowych oraz wielokrotnych odkształceń sprężystych, przy których główną destrukcyjną rolę odgrywa maź stawowa. Jako ciecz jest nieściśliwa i wtłaczana do mikroszczelin (powstałych np. wskutek nagłego, miejscowego przekroczenia dopuszczalnych nacisków) w wyniku pulsacji ciśnienia na skutek zmiennych obciążeń stawu, powoduje rozklinowanie naturalnych, bądź będących wynikiem urazów, mikroszczelin w chrząstce stawowej;

4. **zużycie przez spulszowacenie chrząstki stawowej** – ten typ zużycia nie ma odpowiednika w łożyskach metalowych, a w biołożyskach przejawia się wystąpieniem cienkich włókien (nitek) powstałych na skutek braku równomiernego ubytku anizotropowo zbudowanej chrząstki stawowej, który jest wynikiem jednoczesnego działania procesów tribologicznych oraz zmian chorobowych mazi stawowej, jak też zmian biologicznych samej chrząstki stawowej.

Źródło: Niemczewska-Wójcik M., Piekoszewski W., Analiza procesów tribologicznych występujących w skojarzeniu panewka–główka endoprotezy stawu biodrowego. Biotrybologia, Nr 6-2015, s. 81-92.



Procesy zużycia stawów

W prawidłowo zbudowanych stawach człowieka, m.in. biodrowym, kolanowym i barkowym oraz braku większych przeciążeń i urazów, za główną przyczynę zużycia należy uznać zmiany w składzie chemicznym i ilości cieczy synowialnej. Brak tej cieczy lub nieodpowiednia jej ilość lub jakość, powoduje zmniejszenie się szczeliny stawowej, wskutek czego dochodzi do bezpośredniego styku (bez warstwy smarowej) współpracujących elementów stawu. W efekcie dochodzi do wystąpienia na pewnej głębokości pod powierzchnią stawu do wzrostu naprężeń, a następnie w wyniku wzrostu sił do zatarcia.

Za główną przyczynę przedwczesnego zużycia prawidłowo zbudowanego stawu, należy przyjąć zmiany w składzie mazi stawowej i wtórnie występujące zaburzenia w chrząstce stawowej i w warstwie podchrzęstnej kości. Nawet podczas niedużych urazów obciążenia oddziałują najpierw na kość gąbczastą i strefę podchrzęstną, następnie zaś na chrząstkę stawową. Kiedy obciążenie przekracza wytrzymałość graniczną, dochodzi do odkształceń trwałych i tym samym zmian beleczek kostnych i wytworzenia torbieli rzekomych.

Źródła: Będziński R., Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997;

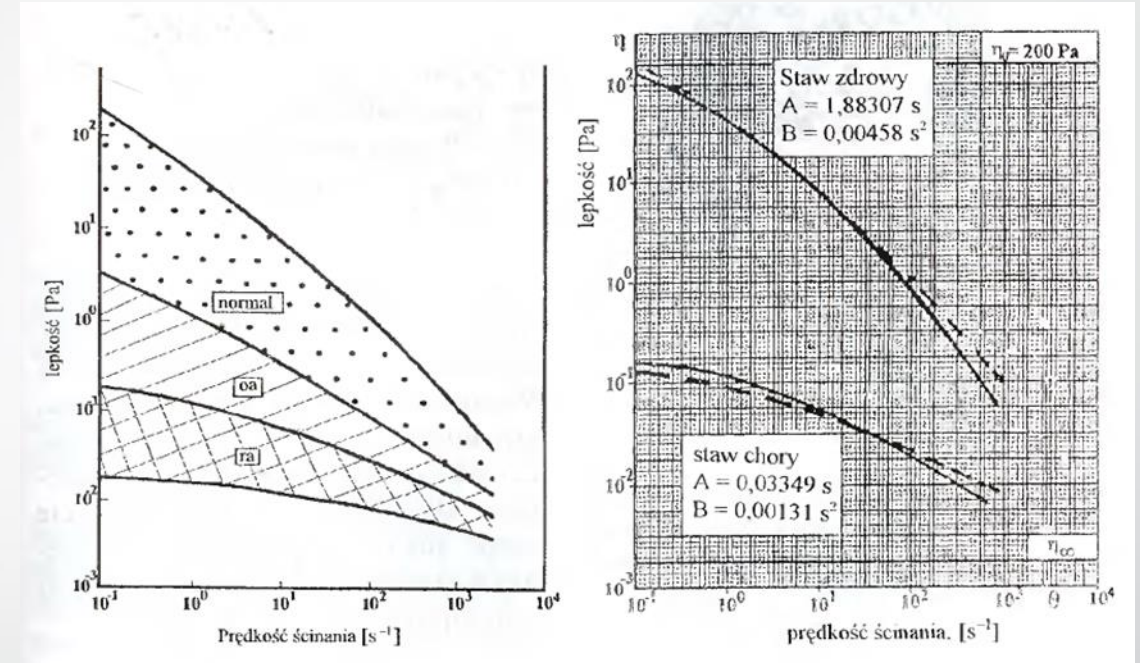
Burcan J., Cwanek J., Gierzyńska-Dolna M., Korzyński M.: Tribologiczne aspekty smarowania naturalnych stawów człowieka. Tribologia – teoria i praktyka 4(1996), s. 321-337.



Procesy zużycia stawów

Ciecz synowialna, pobrana ze stawów chorych na dnę moczanową (podagrę), wykazujących zmiany zwyrodnieniowe czy też po urazach mechanicznych, wykazuje odmienne charakterystyki reologiczne.

Wartość jej lepkości strukturalnej jest znacznie mniejsza od wartości lepkości strukturalnej zdrowej cieczy. Następują zmiany w strukturze, zmniejsza się liczba oraz wielkość kompleksów; o połowę zmniejsza się ich masa cząsteczkowa wskutek degradacji asocjatów kwasu hialuronowego.



Zmiany lepkości płynu synowialnego w stawie zdrowym (**normal**) i chorym (**oa** osteoarteroza, **ra** reumatyczne zapalenie stawów).

Porównanie lepkości dynamicznej cieczy synowialnej w funkcji prędkości ścinania (deformacji) u człowieka zdrowego i chorego.



Procesy zużycia stawów

Przyczynami uszkodzeń stawów człowieka są:

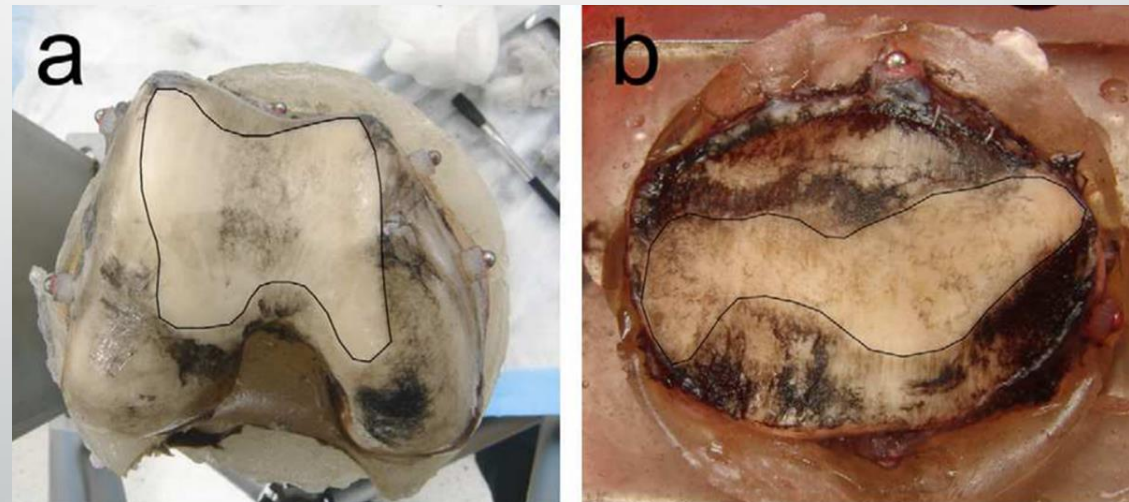
- zmiany chorobowe,
- mechaniczne przeciążenia stawów.

Z biotribologicznego punktu widzenia przyczyną rozpoczynającą niszczenie zarówno łożyska jak i stawu człowieka jest:

- brak mazi stawowej,
- deformacja kości stawu lub jej pęknięcie
- obszarowe zniszczenie chrząstki.

Powierzchnie stawowe w stawie biodrowym starte w wyniku nacisków :

a – głowa kości udowej, b – panewka stawu.





Dziękuję za uwagę i zapraszam na kolokwium
zaliczeniowe

