

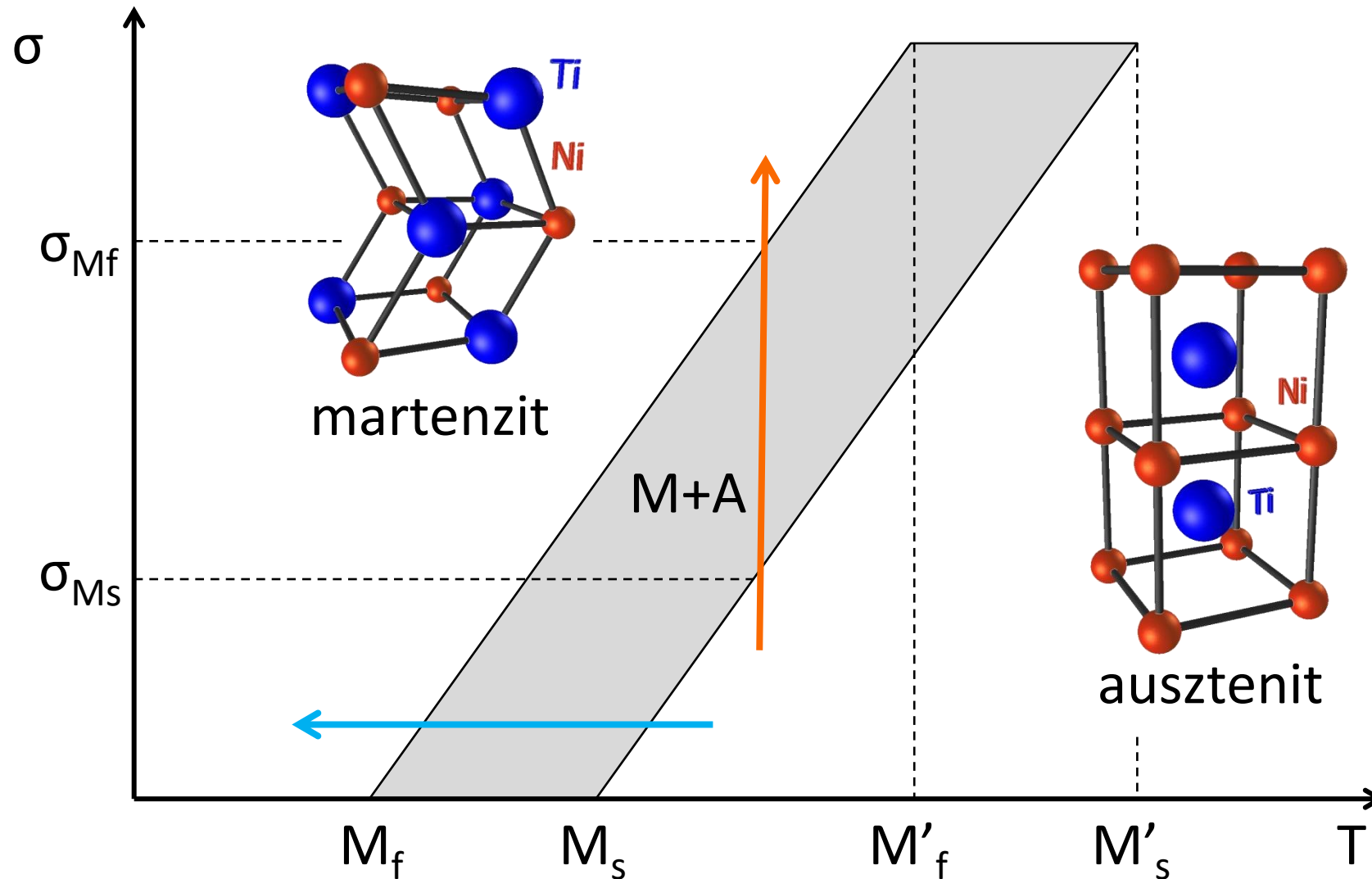
ALAKEMMLÉKEZÉS MECHANIZMUSA, KÁROSODÁSI FOLYAMATOK

Orvostechnikai anyagok
BMEGEMTNGK6
2025. 02. 25.
Dr. Kemény Alexandra
kemeny.alexandra@gpk.bme.hu

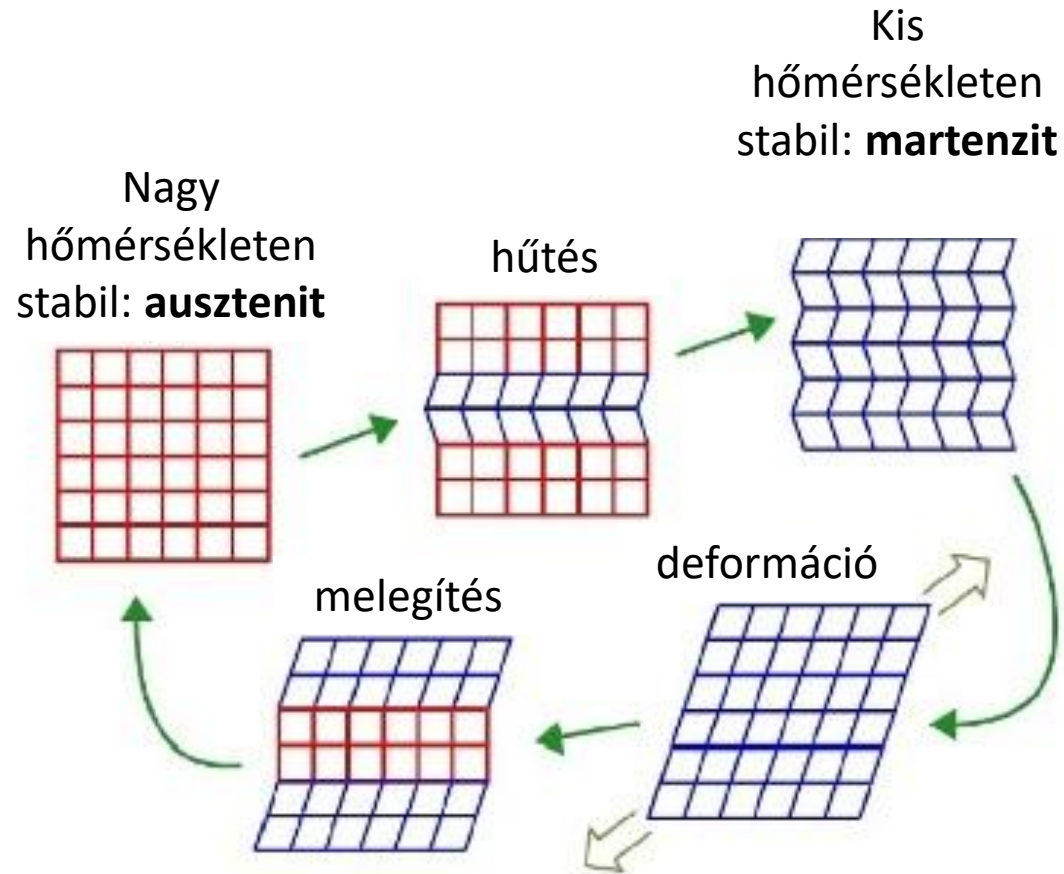
- 1932 - Arany-Kadmium (Arne Ölander)
- 1938 - Sárgaréz
- 1950 - Indium-Titán
- 1961 - **Nikkel-Titán** + **Naval Ordnance Laboratory** → Nitinol (William J. Buehler & Frederick Wang)

AuCd	CuAlNi	CuZn	TiNiCu	FeMnSi
AgCd	CuSn	NiTi	NiAl	TiNiV
FePt	CuAlBe	InTl	FePd	CuAlMnZr
CuZnAl	MnCu	TiTa	CuAlMn	TiNiHf

- Az alakemlékező ötvözetek különböző terhelések hatására alakváltozást szenvednek. Ez az alakváltozás azonban alapvetően különbözik a hagyományos fémötvözetek esetében jól ismert hőtágulás, vagy a húzó, nyomó terhelések által okozott alakváltozástól az alábbiak miatt:
 - Az **alakváltozás folyamata** az alakemlékező ötvözetek anyagszerkezetében a kristályszerkezet átrendeződésével, azaz **fázisátalakulással** magyarázható.
 - **Kisebb terhelés** hatására is **drasztikus hosszváltozás**, vagy más alakváltozás váltható ki.
 - Az alakváltozás **nem vezet** az alakemlékező ötvözet **károsodásához**, sőt, az alakemlékező ötvözet ismételten (több tízezerszer vagy akár több milliószor) képes elviselni drasztikus alakváltozást az anyag károsodása nélkül



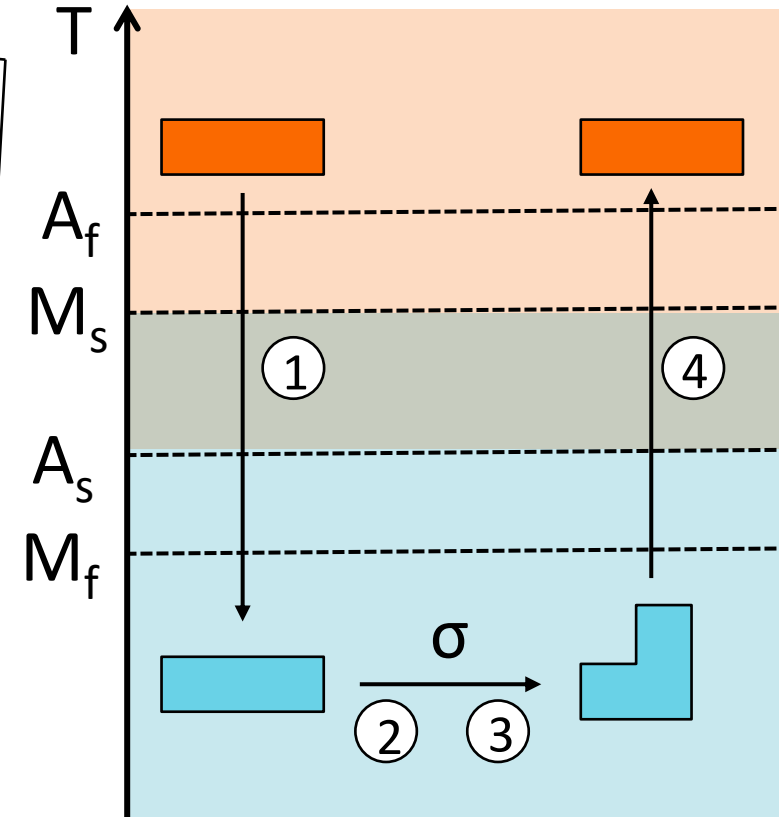
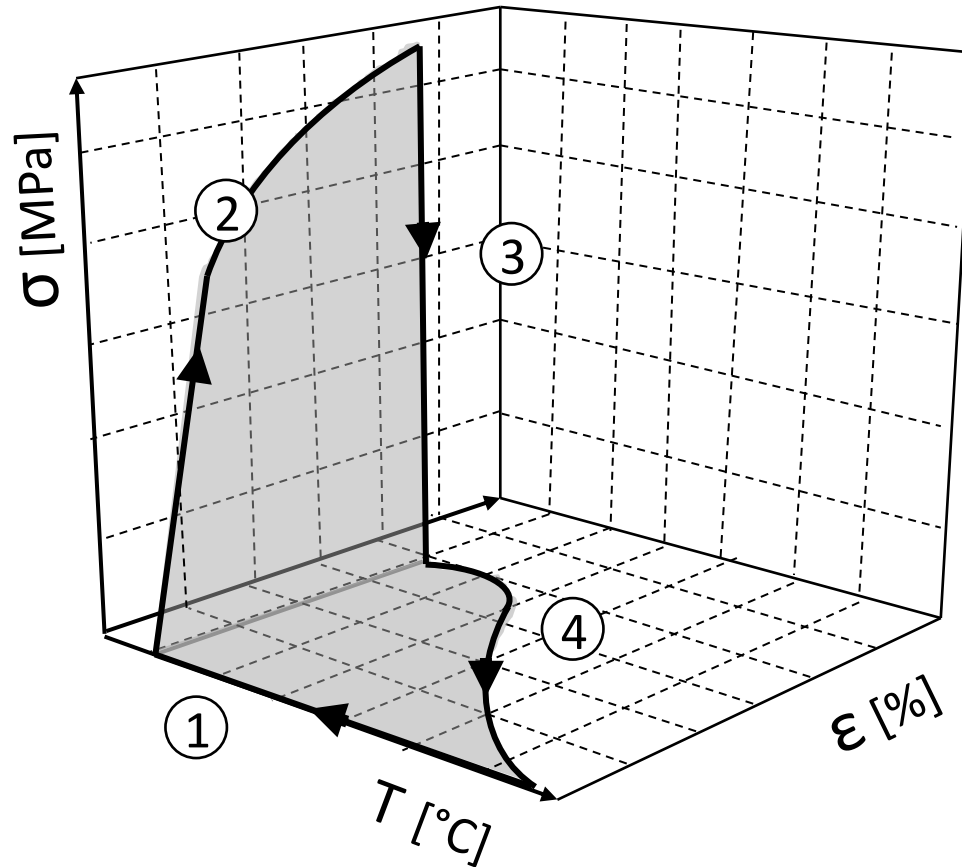
- Szimmetrikus kristályszerkezet
- Köbös elemi cellák szögei merőlegesek
- Emiatt egyféle ausztenit kristály változat



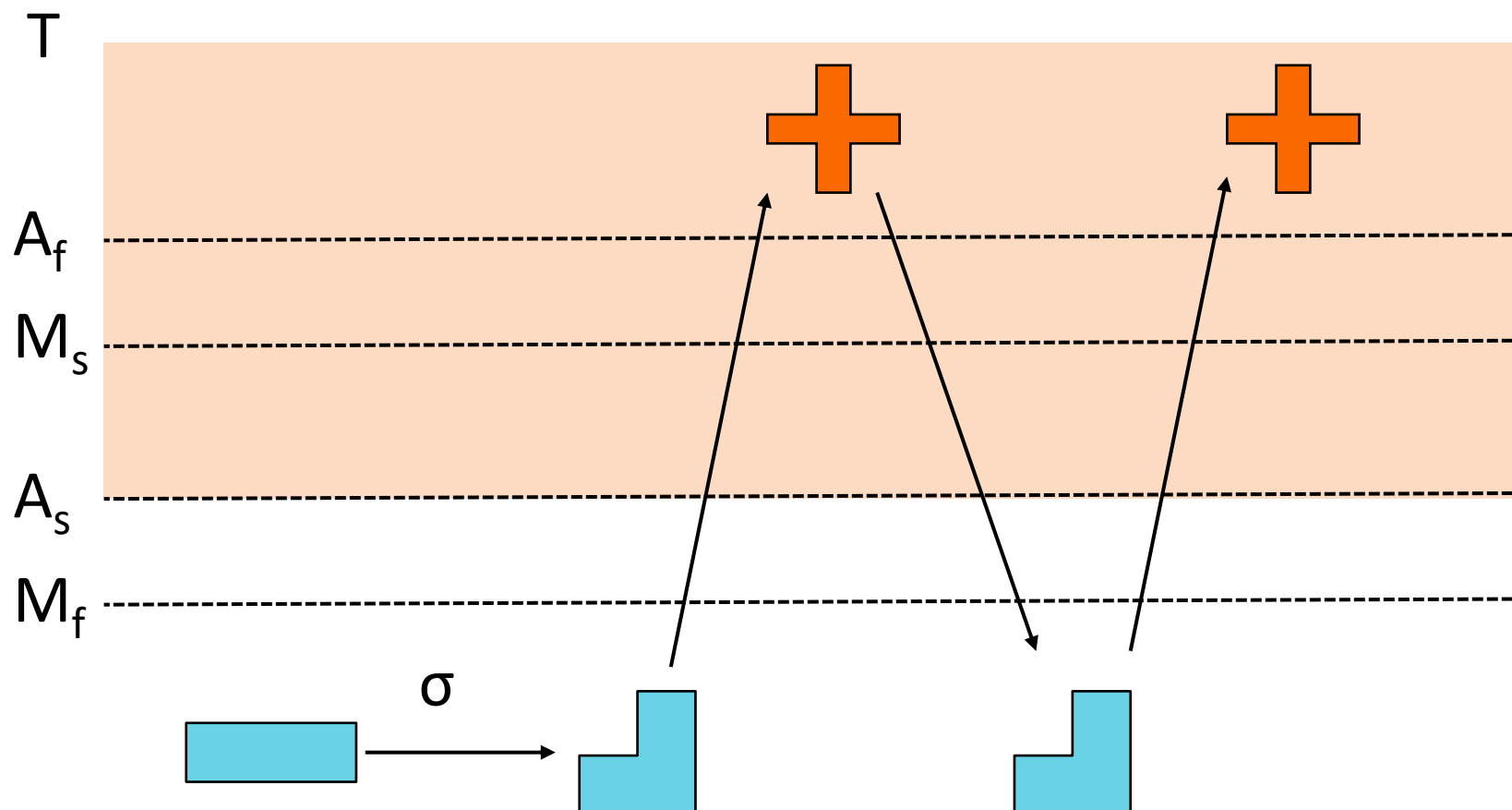
- Elemi cellák szögei nem merőlegesek
- Szomszédos (ikerkristály) rétegek orientációja kétféle lehet: ellentétes, azonos
- Emiatt többféle martenzit kristály változat
- Kristály orientáció befolyásolható: martenzit átalakulás közben külső terheléssel

- NiTi: ~55% Ni, ~45% Ti
- <https://youtu.be/s62PL5vmfNw?si=P2kmi-YJKSYXhP1A>

- Hevítés hatására jön létre

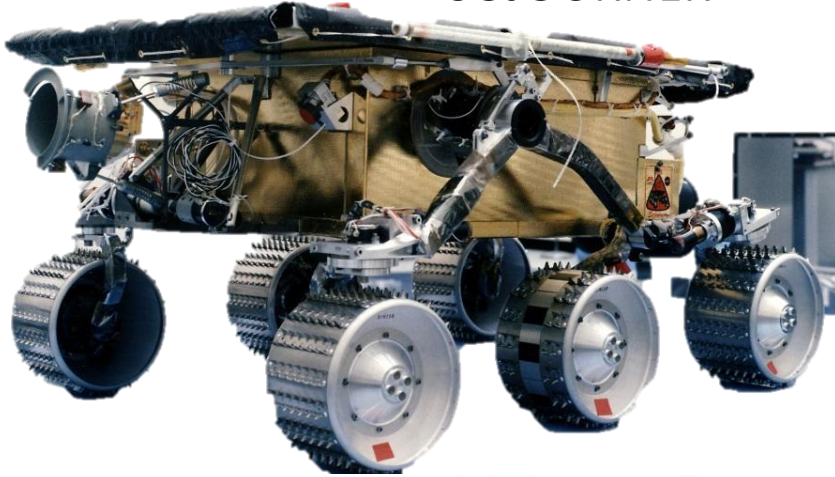


- Hevítés és hűtés hatására jön létre
- Telítődő maradó alakváltozás miatt

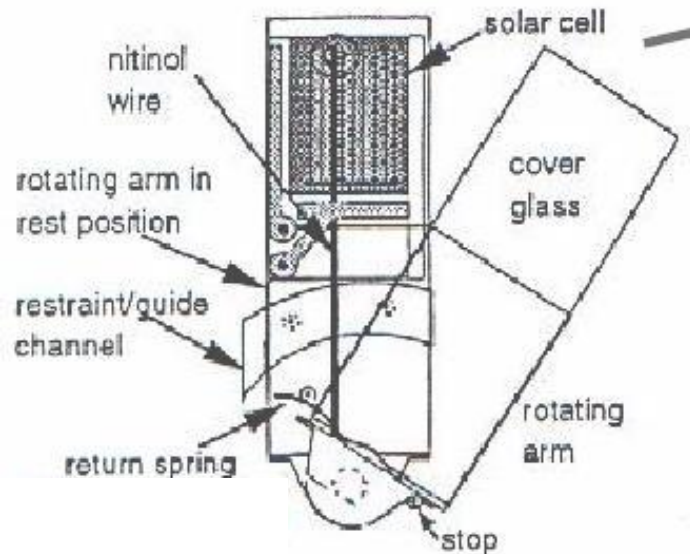


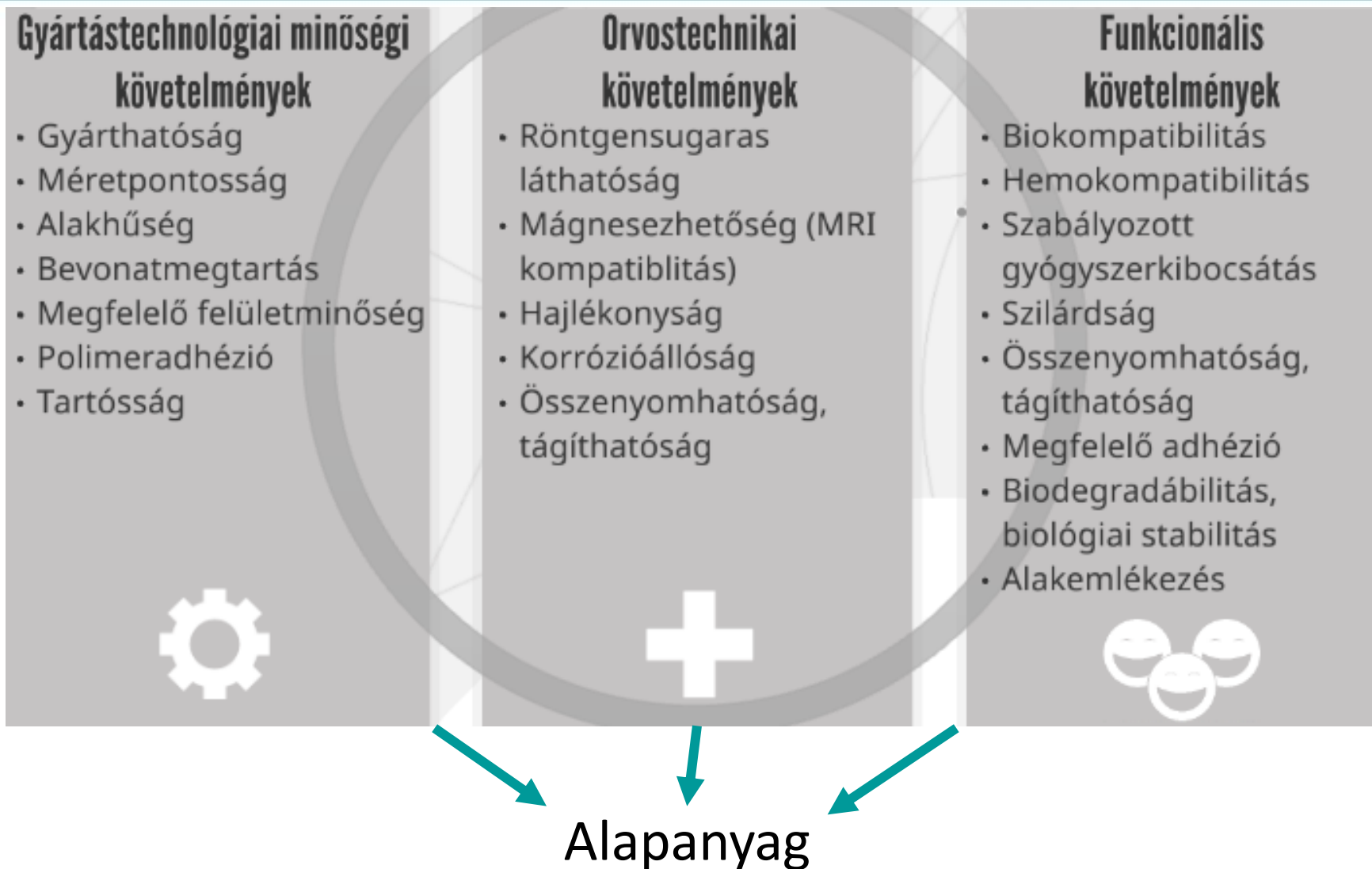
Mars autó

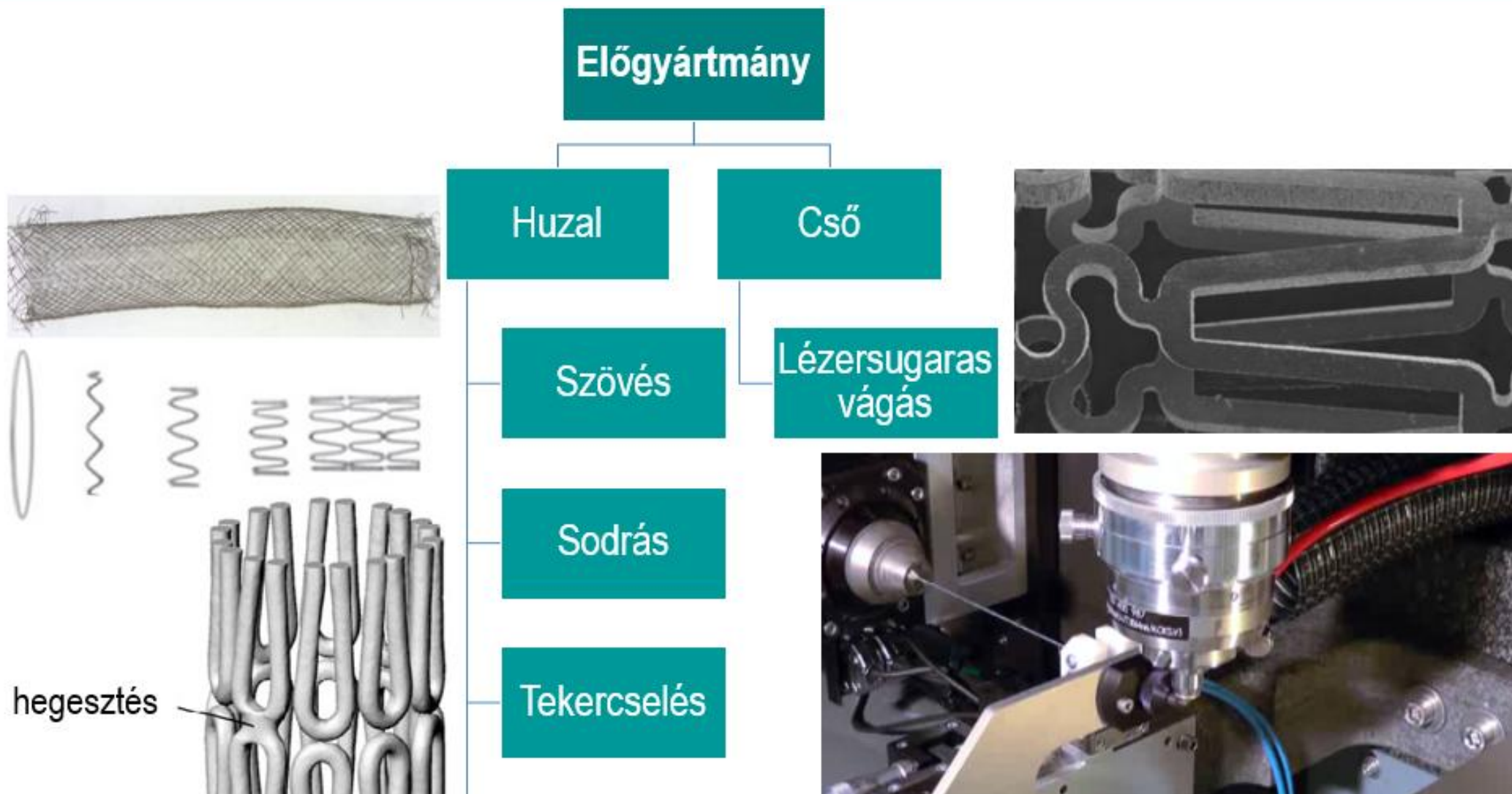
SOJOURNER

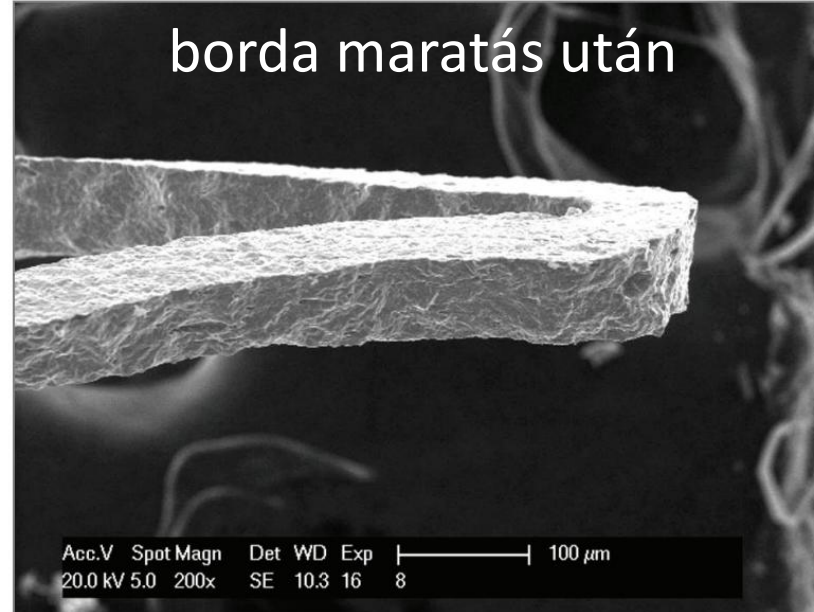
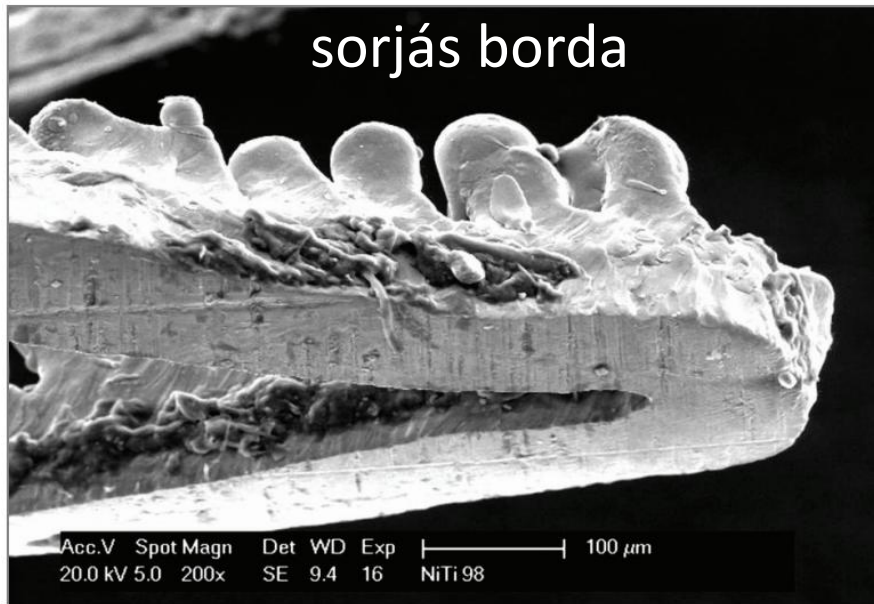


<https://youtu.be/t2iHopdlFBg?si=FSwdTKwBqkd1oW-S>

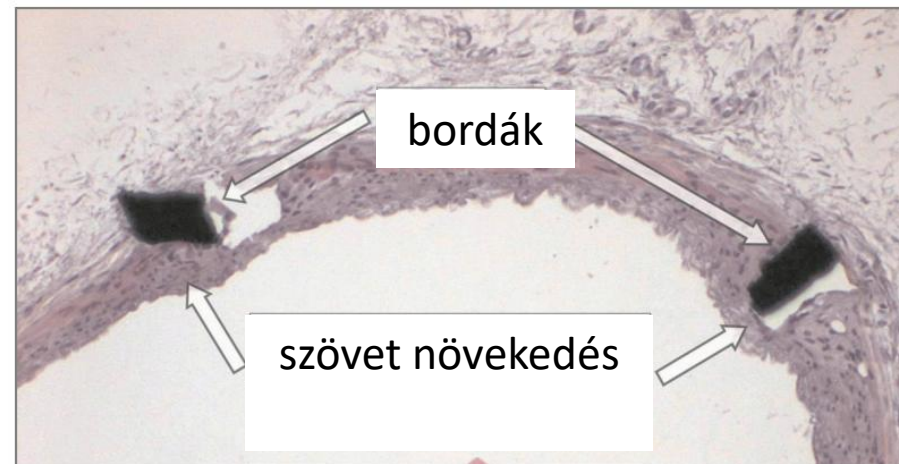








28 nappal
beültetés
után



- Az implantátumok élettartamuk folyamán számos mechanikai és korróziós igénybevétel éri, amelyek hatására a legkörültekintőbb tervezés és gyártás ellenére is hibák, eltérések fordulnak elő
- **Leromlás:** a fellépő hatások eredményeképp az anyagnak bizonyos tulajdonságai romlanak pl. szilárdságcsökkenés
- **Károsodás:** túlterhelés, elhasználódás vagy külső hatás következtére beálló csökkent vagy nem megfelelő működés // a tervezett élettartamot csökkentő elváltozás pl. vápabetét kopása
- **Tönkremenetel:** a károsodás legsúlyosabb foka, azonnali működésképtelenség pl. törés

Implantátumok Károsodása $\leftrightarrow$ Tönkrementele

Biofunktionalitás,
biokompatibilitás



Élő szervezettel való
kölcsonhatás hosszú távon



- Legegyszerűbben megfogalmazva az **élettartam** az az idő, „ameddig a termék használható”
- **Életciklus**: a termék fejlesztésétől kezdve a piacról kivételéig tartó időtartam
- A termék életciklusa során tapasztaltak felhasználhatók a termék élettartamának növelésére (PDCA), ezért fontos a piacra dobás utáni folyamatos monitorozás
 - Gyártás közbeni ellenőrzések
 - Felhasználói visszajelzések gyűjtése
 - Káresetek regisztrálása, kivizsgálása pl. FDA adatbázis



- Anyagok mechanikai tulajdonságai (szilárdsági és rugalmassági jellemzők)

Table II. Mechanical properties of implant alloys and human bone.					
Material	Tensile Strength (MN/m) ²	Yield Strength (MN/m) ²	Vickers Hardness (H _v)	Young's Modulus (GN/m) ²	Fatigue Limit (GN/m) ²
316L SS	650	280	190	211	0.28
Wrought Co-Cr Alloy	1540	1050	450	541	0.49
Cast Co-Cr Alloy	690	490	300	241	0.30
Ti-6Al-4V	1000	970	---	121	---
Human Bone	137.3	---	26.3	30	---

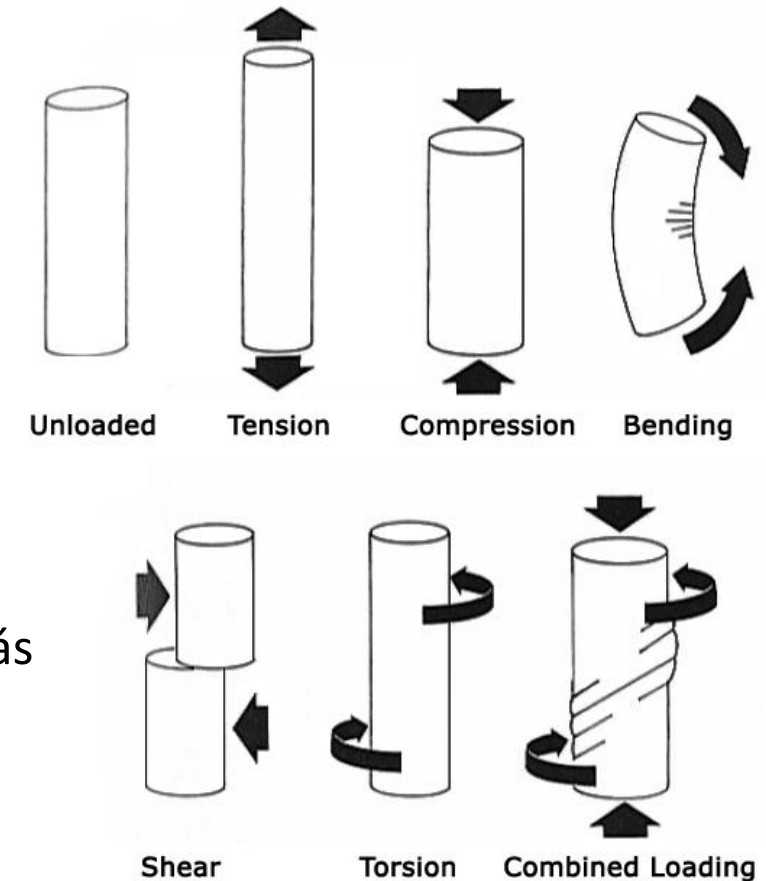
- Anyagok és a rendszer súrlódási tulajdonságai
- Kopásállóság
- Felületi jelenségek
- Anyagok degradációja, korróziója



- Nem megfelelő **anyagválasztás**
 - Rossz tervezés, **struktúra**
 - Rossz **gyártástechnológia**, gyártás során felmerülő hibák
 - **Implantátum kiválasztás**: nem megfelelő méret, anyag, típus
 - **Műtét során**: technika, implant mix, orvosi hiba, fertőzés
 - **Gyógyulási folyamat**: gyógytorna, csontosodás, korai terhelés
 - **Beteg életmódja**: táplálkozás, dohányzás, alkoholfogyasztás, mozgás, túlterhelés
 - Szabályok betartása
-
- Ki a hibás?
 - Gyártó – Orvos - Beteg



- Mechanikai terhelések
 - Statikus
 - Dinamikus (impulzusszerű/egyenletes)
- Terhelésátadás, igénybevételek
 - Normálerők, hajlítás, csavarás, nyírás, összetett igénybevételek
- Feszültségek eloszlása, kialakuló feszültségmező
- Egyéb igénybevételek
 - Termikus, vegyi, elektrokémiai, áramló közeg miatti, koptató, sugárzás okozta, biológiai
- Anyagok, anyagrendszerek mikro- és makroszerkezete



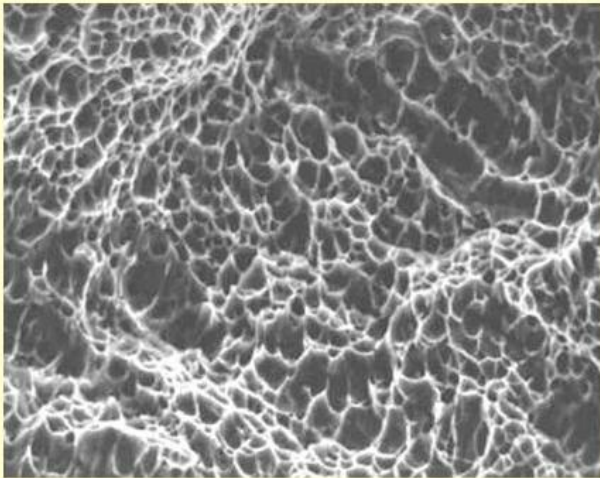
- Törés
- Kifáradás
- Korrózió
- Kopás
- Erózió
- Külső behatás okozta sérülések

- Az anyagot alkotó részecskék közti kapcsolat folytonosságának makroszkópikus méretű megszűnése, amelyet olyan mérvű mechanikai igénybevétel okoz, amely nagyobb a részecskék közt ható kötőerőknél.
- A törés folyamata:
 - repedés keletkezése
 - repedés növekedése
 - repedés terjedése
 - anyag végső szétválása
- A törés kiváltó oka lehet:
 - túlterhelés
 - ismétlődő igénybevétel (fárasztás)
 - kúszás

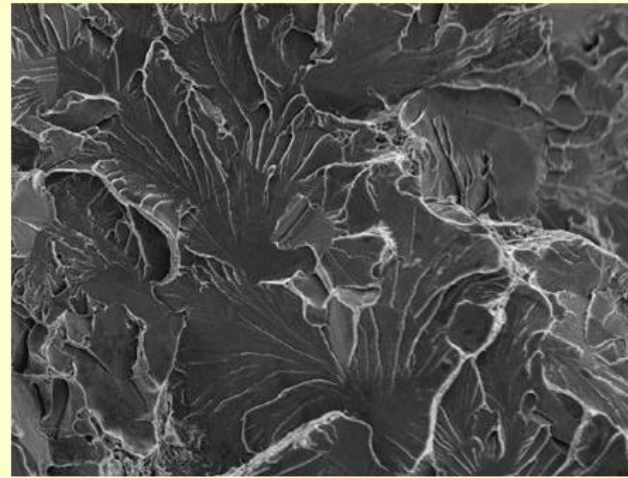


- Repedésterjedés:

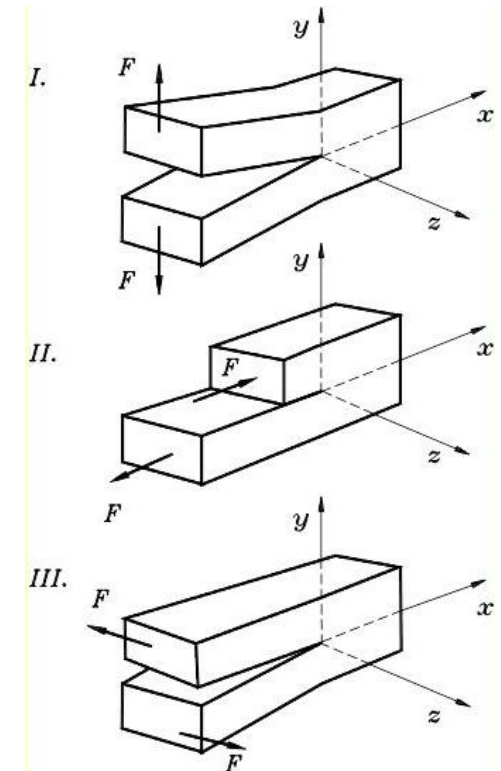
- Lassú: kúszás és kifáradás, terhelés növelése mellett – szívós törés
- Gyors, instabil: alakváltozás nélküli – rideg törés



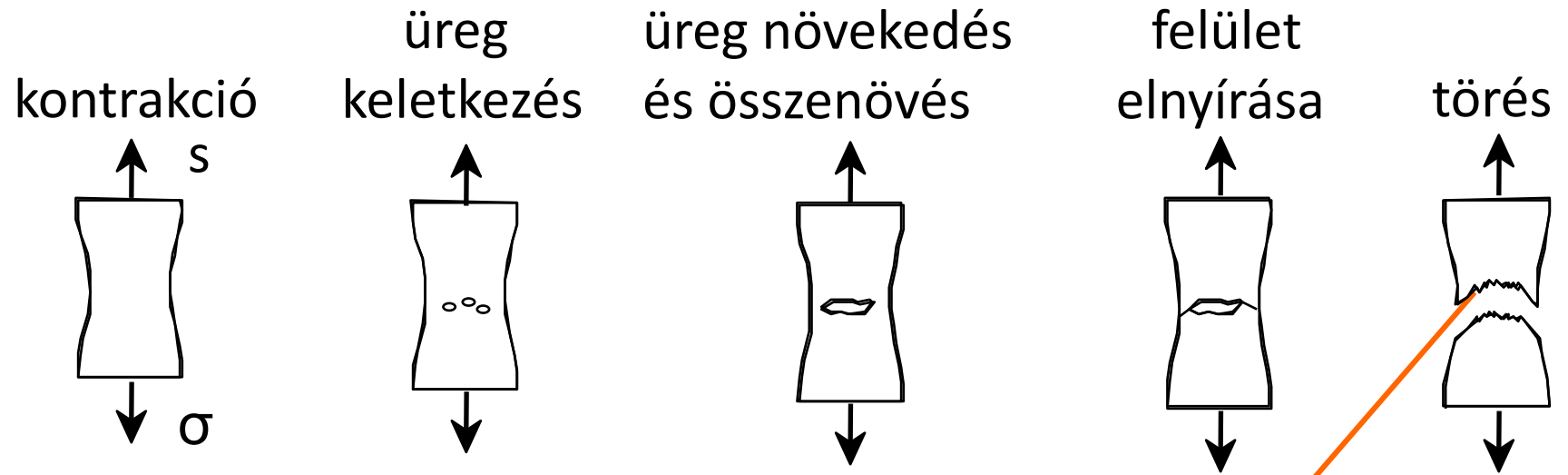
Szívós



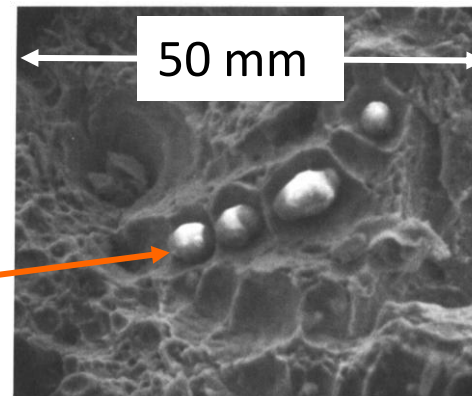
Rideg



- Jelentős mértékű képlékeny alakváltozás a törés előtt.

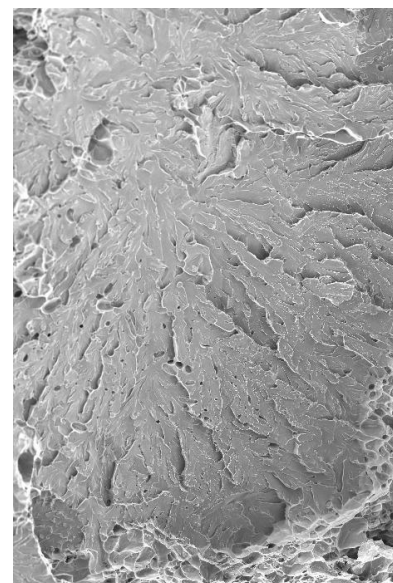
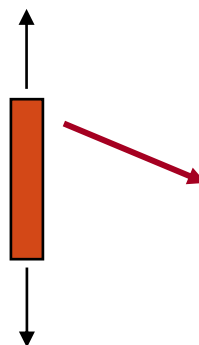


Acél töret-
felülete

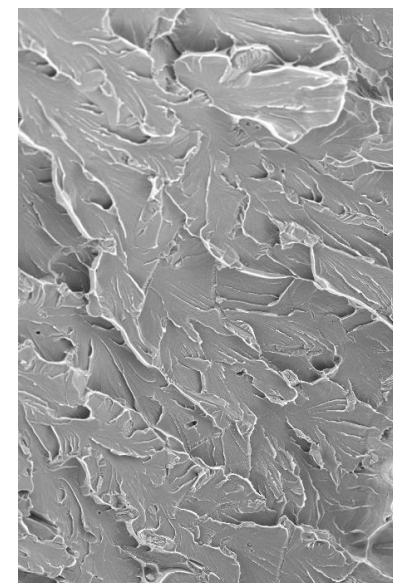


Második fázisú részecskék,
elősegítik üregek keletkezését.

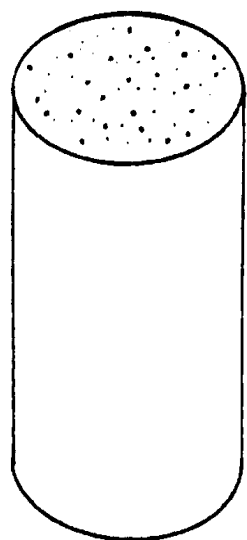




LSRUHE 10μm EHT = 5.00 kV
LEM: BB File Name = Bruch_



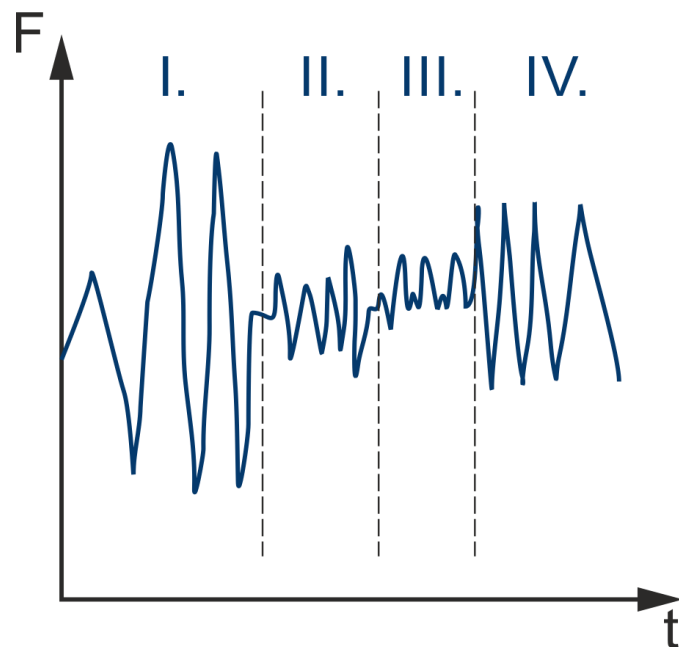
UNI KARLSRUHE 2μm EHT = 5.00 kV
LEO1530 LEM: BB File Name = Bruch_



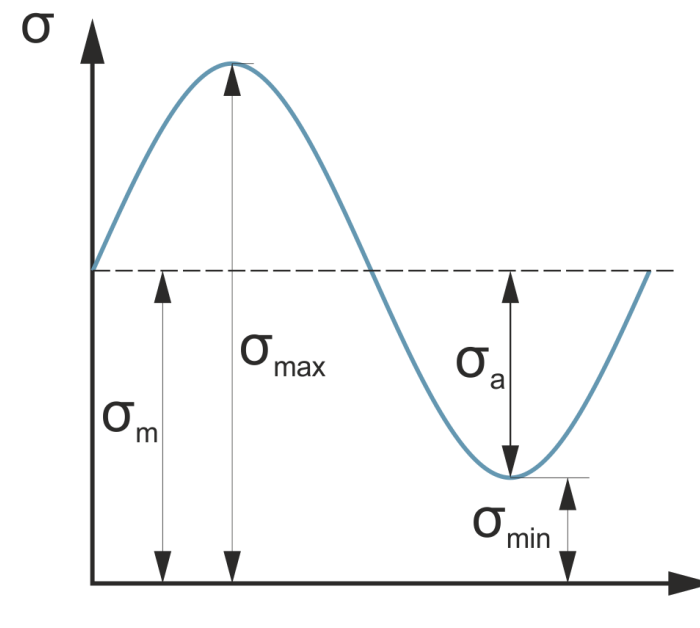
- A töretfelület merőleges a húzás tengelyére.
- Kontrakció nem lép fel az alakítás során .
- Nincs makroszkopikus képlékeny alakváltozás.
- A töretfelület átmetszi a szemcséket.

A kifáradás jelenségét A. Wöhler ismerte fel az 1800-as évek végén. Biztonságra méretezett vasúti tengelyek hosszabb üzemidő után az ismétlődő igénybevételek hatására eltörtek, annak ellenére hogy a terhelő feszültség **jóval a folyáshatár alatt** volt. Ez a jelenség hívta fel a figyelmet a kifáradásra.

Valóság

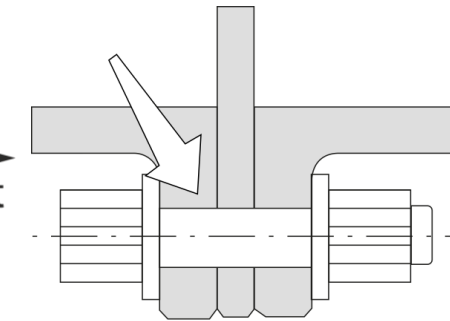
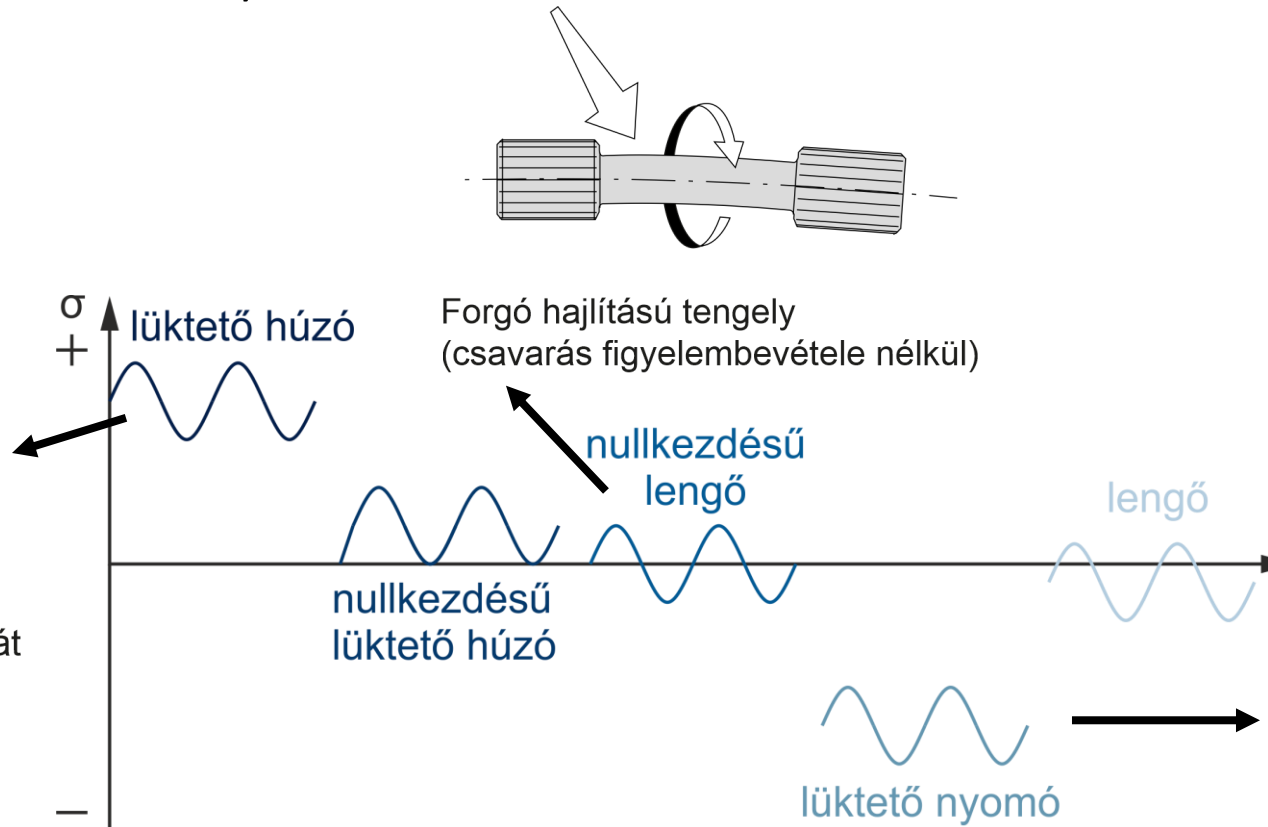
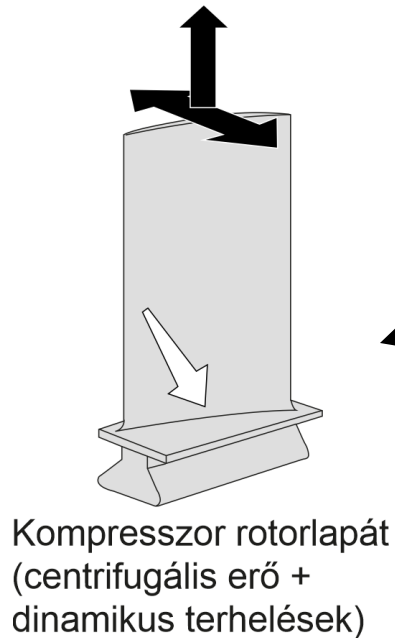
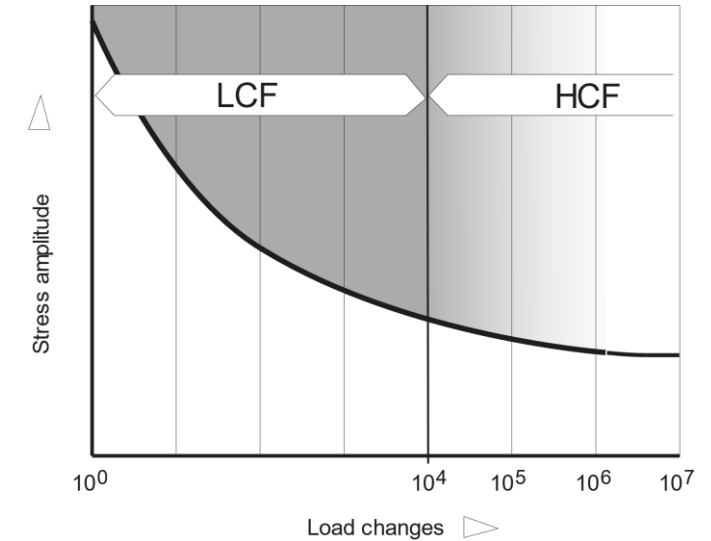


i. blokk modell



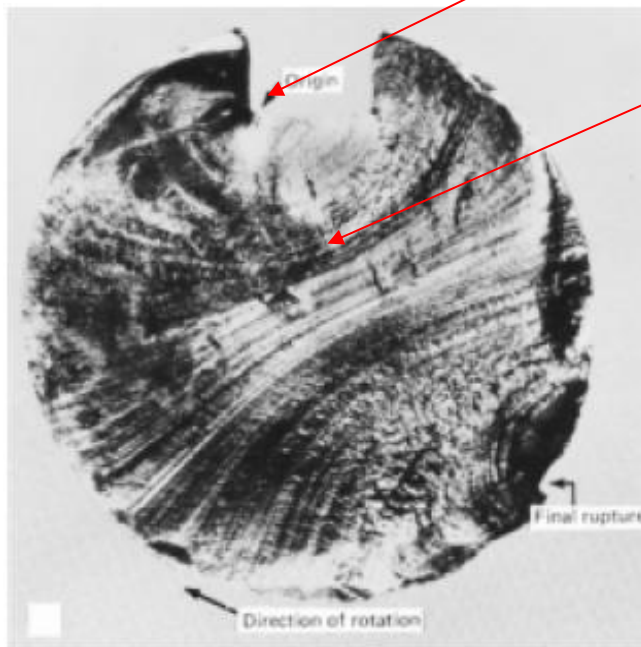
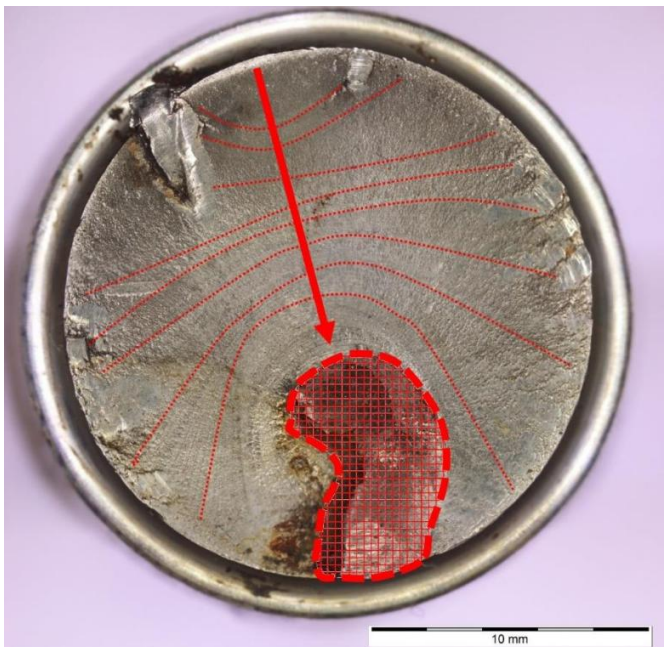
A ciklikus terhelés szintje kisebb mint a folyáshatár: **nagyciklusú fáradás (HCF)** ($N \sim 10^6 - 10^8$)

A ciklikus terhelés szintje nagyobb mint a folyáshatár: **kisciklusú fáradás (LCF)** ($N \sim 10^3 - 10^4$)

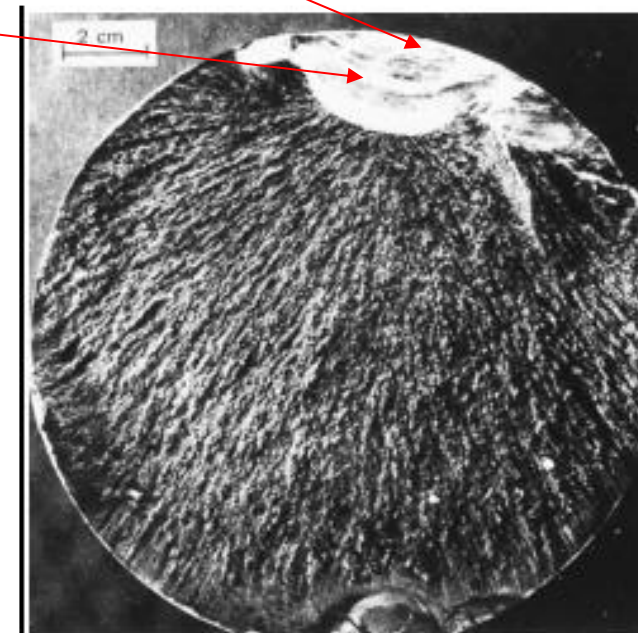


Csavarozott karima

Repedés keletkezés



Lassú terjedés
(kagylós felület)

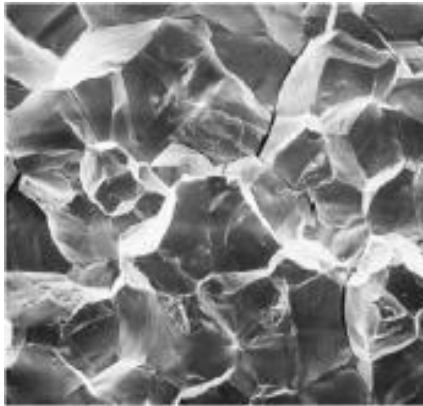


Ridegtörés

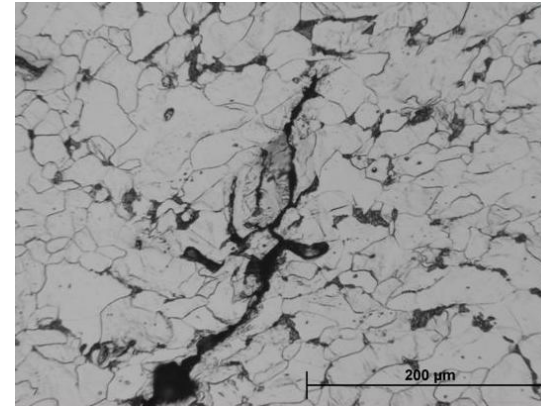
- Kagylós töret jön létre, ahol a vonalak görbületi középpontja a repedés kiindulási pontjába mutat

- Fémes anyagokban a magas hőmérsékleten lejátszódó kúszási folyamatok végső szakasza a kúszás által okozott törés
- Ezt a törési típust gyakran az anyag pórusképződéssel vagy karbidkiválással kapcsolatos interkrisztallin károsodása okozza
- Erősen lokalizált hő- vagy mechanikai terhelés esetén azonban már rövid idő után is a szemcsékben üregnövekedés révén transzkrisztallin repedések alakulhatnak ki

- Képlékeny alakváltozás mértéke a repedés terjedésekor
- Terjedéskor elnyelt energia mennyisége (szívós vagy rideg anyag)
- Repedésterjedés sebessége
- Törés mechanizmusa (képlékeny alakváltozás kísérete szemcsekiszakadások vagy hasadási síkok mentén)
- Töretfelület morfológiája (transzkrisztallin vagy interkrisztallin törés)



Hasadásos törés



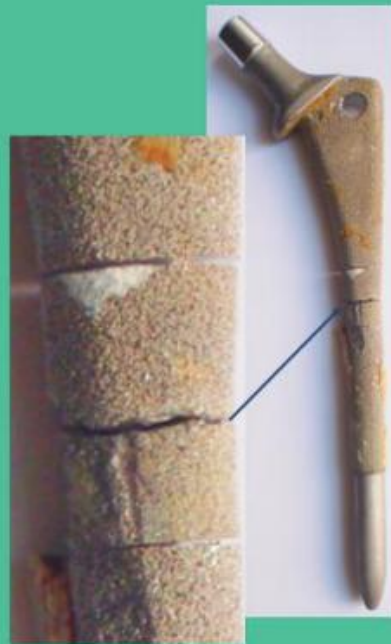
Transzkrisztallin repedés



- Hibás:
 - Implantátum
 - Anyag
 - Geometria
 - Műtéti technika
 - Használat
 - Beteg testtömegindexe
 - Életkora
 - Fizikai aktivitása
 - Sérülések
- Eredmény:
 - nem megfelelő implantátum-szövet kapcsolat



- Szemrevételezés
 - Alapvető eltérések, nem megfelelőségek, anomáliák rögzítése makroszkópiusan
- Röntgenes vizsgálatok
 - Belső hibák, anyagfolytonossági hiányok feltárása
- Fraktográfia
 - A töretfelület elemzése
- Metallográfia
 - Az anyag mikroszerkezetének vizsgálata csiszolatokon
- Keménységmérés
- Szilárdságmérés
- Anyagösszetétel-elemzés



DePuy AML®



DePuy MMA®



Zimmer CPT®

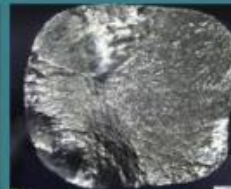
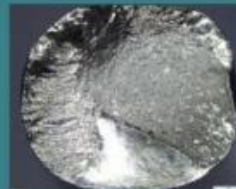
Töretfelület
Alsó Felső



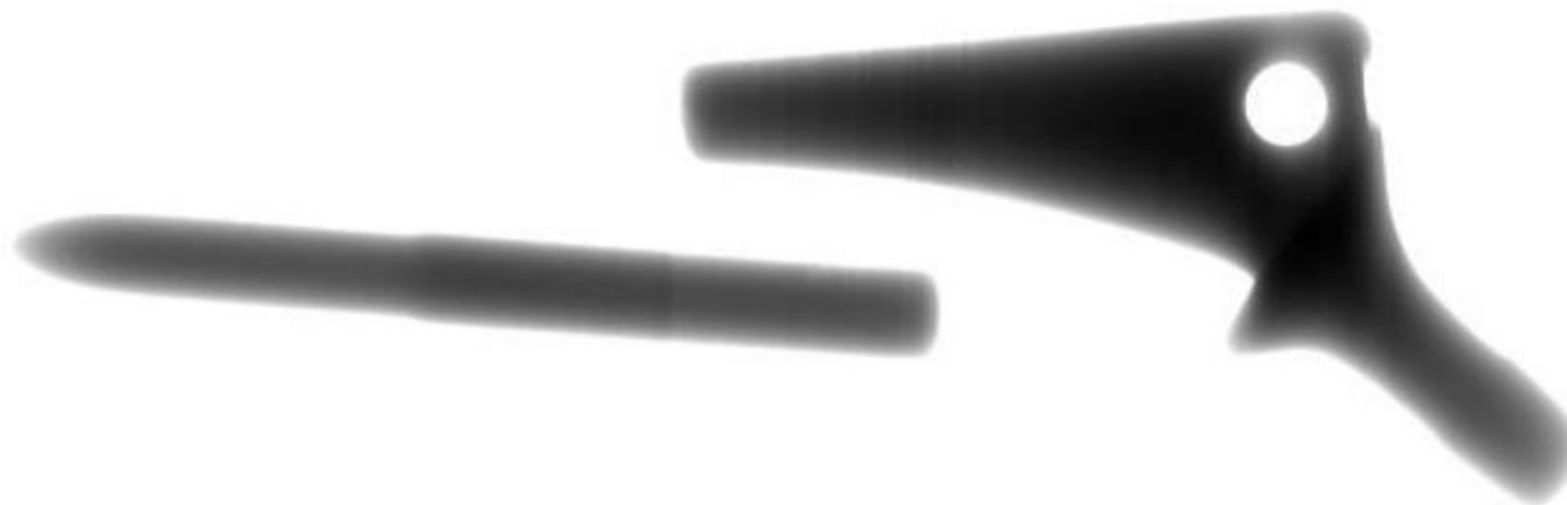
Töretfelület
Alsó Felső

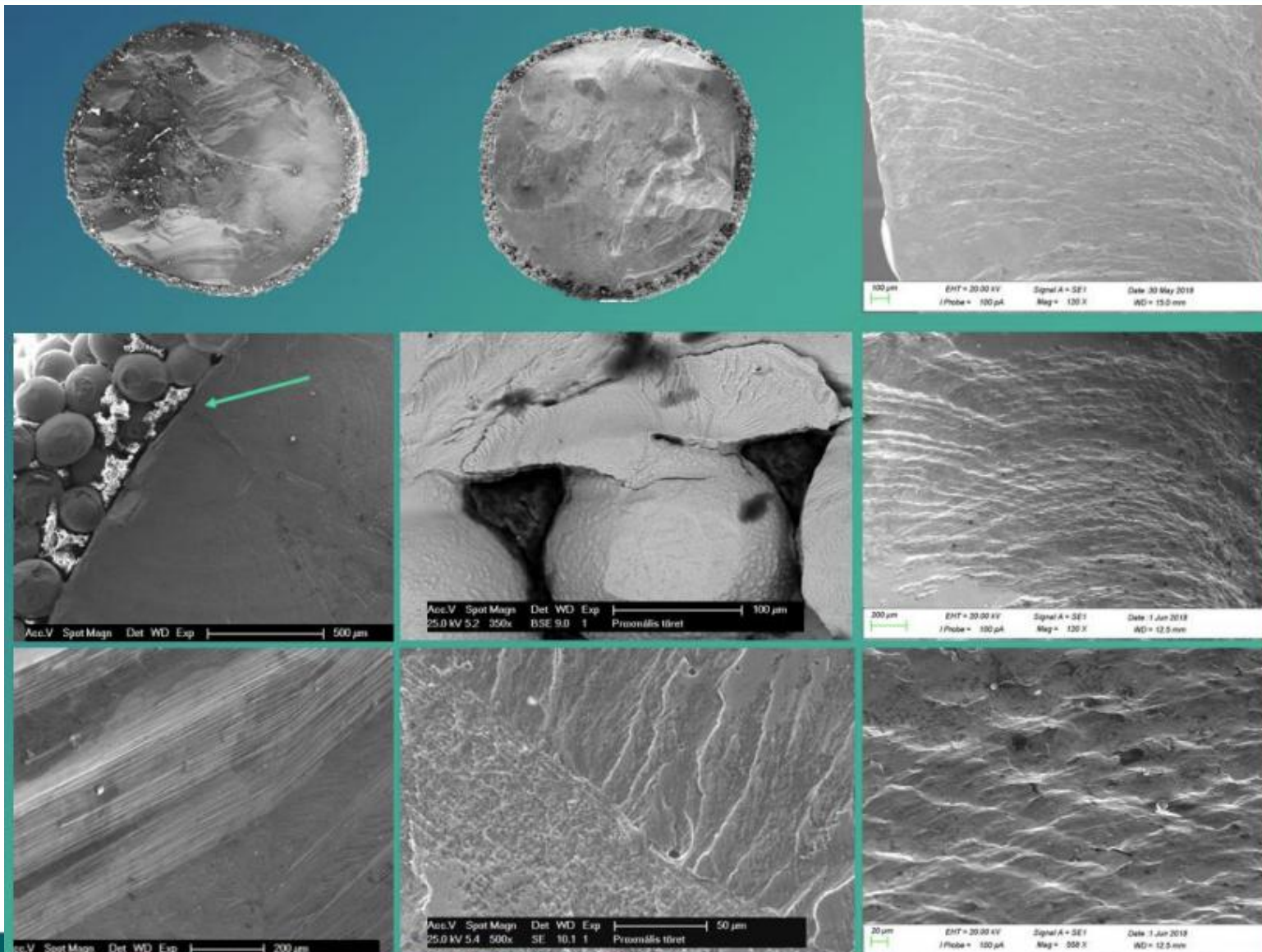


Töretfelület
Alsó Felső



- A vizsgálat célja az anyag belsejében lévő, gyártási eredetű térfogati anyaghibák feltárása. A röntgenmikroszkópos vizsgálat térfogati hibát egyik protézis esetében sem tárt fel.

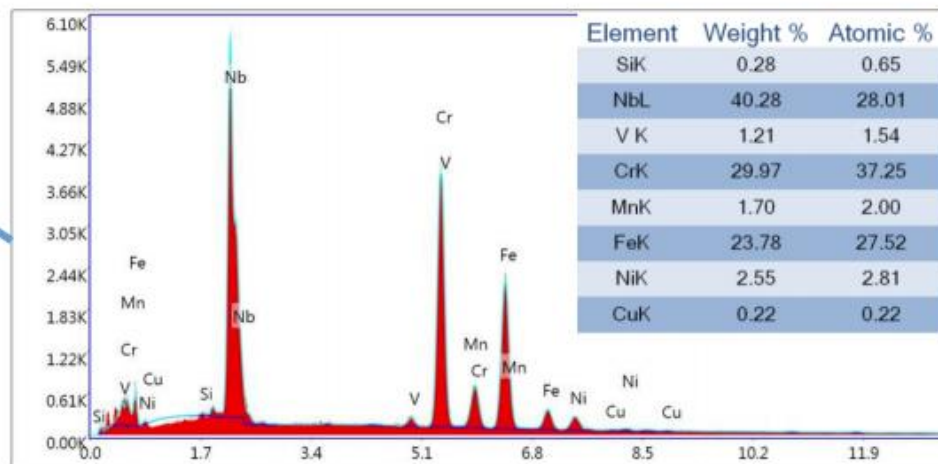
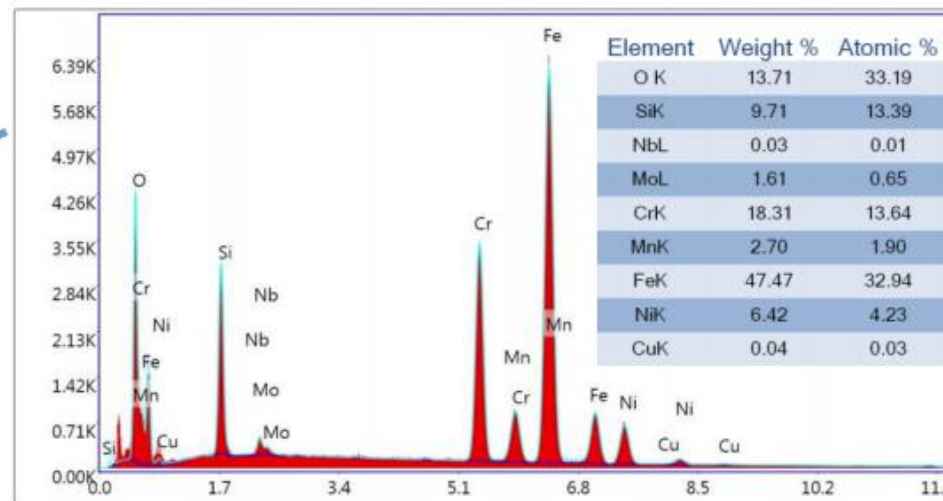
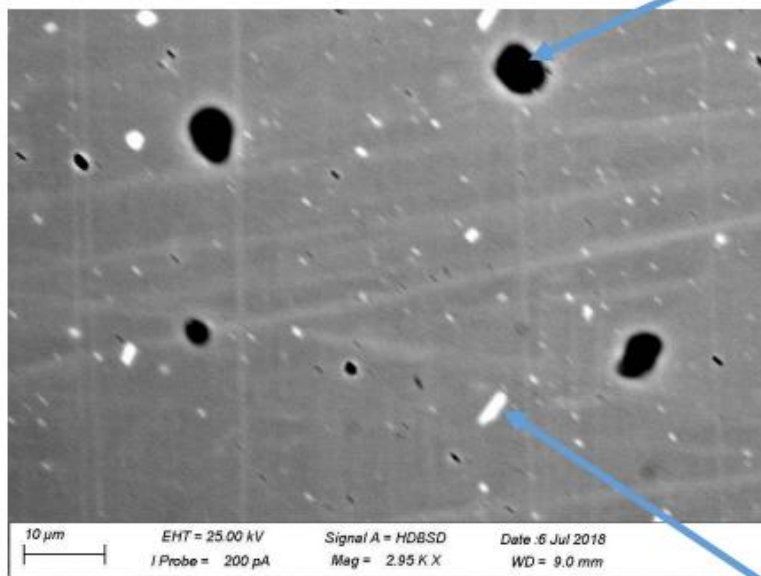




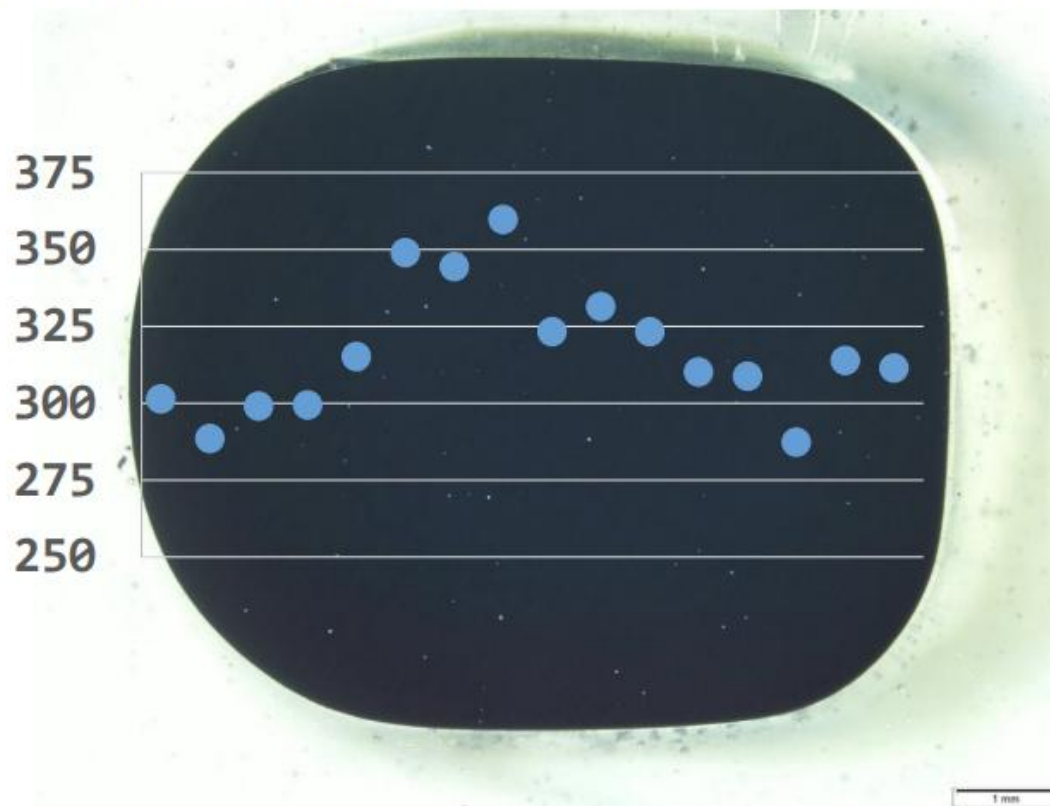
A repedéshépződési hely, a fáradásos repedésterjedés

Repedés a bevonatot alkotó gömb nyakánál, fáradásos repedésterjedés

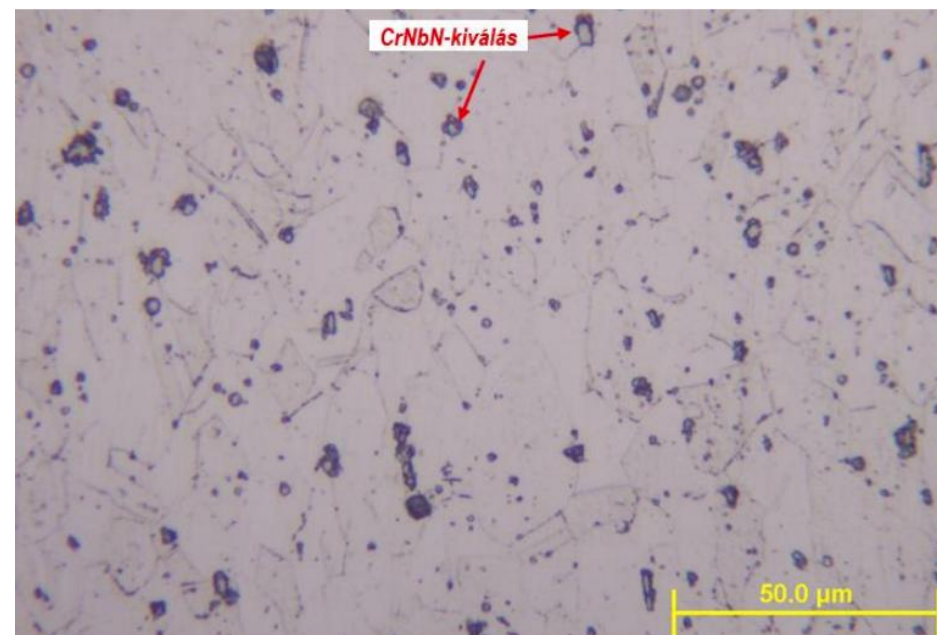
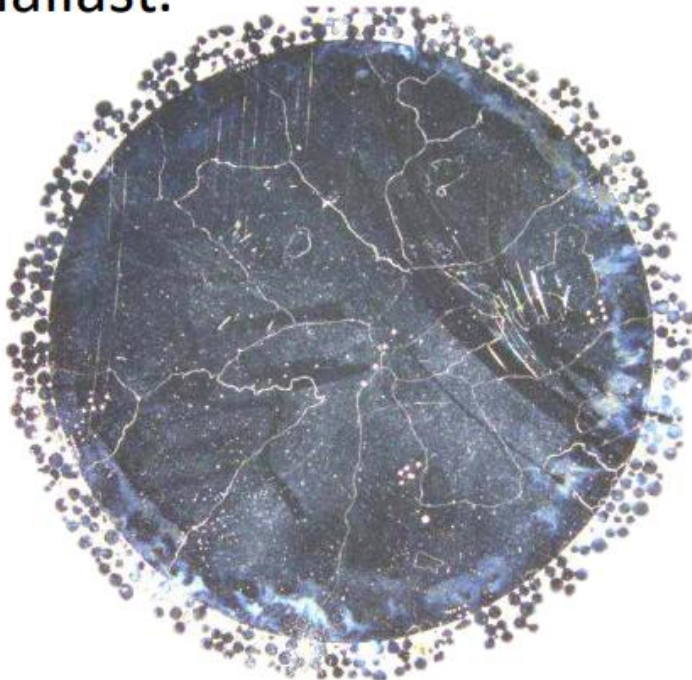
Fáradásos repedésterjedés



- A keménységvizsgálat során a szár felülete mentén jelentős keménységbeli eltérések mutatkoztak. Ez a durvaszemcsés szerkezet mechanikai anizotrópiájának a hatása, és fokozza a repedésképződéssel, repedésterjedéssel szembeni ellenállás gyengülését.

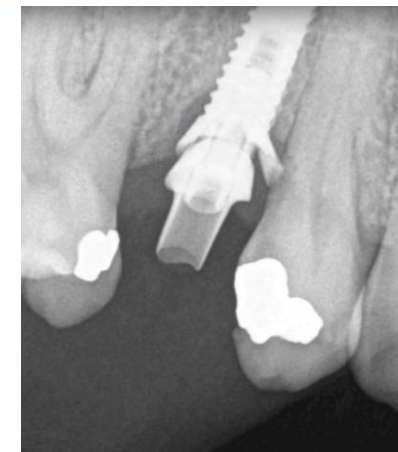


- A metallográfiai vizsgálat alapján megállapítható, hogy a szövetszerkezet rendkívül durvaszemcsés, ami erősen rontja a szívósságot és ezzel a repedésterjedéssel szembeni ellenállást.



- Fogászati implantátumok törése:

- Túl vékony nyaki rész
- Túl kicsi falvastagság





- Implantátum szár törés – 12 hónapig
- Szár elmozdulás
- Elváltozás a combcsontban
- CoCr – cementált DePuy implantátum
- OK: nem elegendő cementezés a prox. combcsont részen





- 52 éves férfi
- Nagylábujj ízület rögzítése
- Csavartörés



- 36 éves férfi – golyó miatti combcsont törés
- Külső majd belső rögzítés, elfertőződés
- 12 évvel később többszörös implantátum törés

- Fémkorrózió MSZ EN ISO 8044:2003 definíciója:

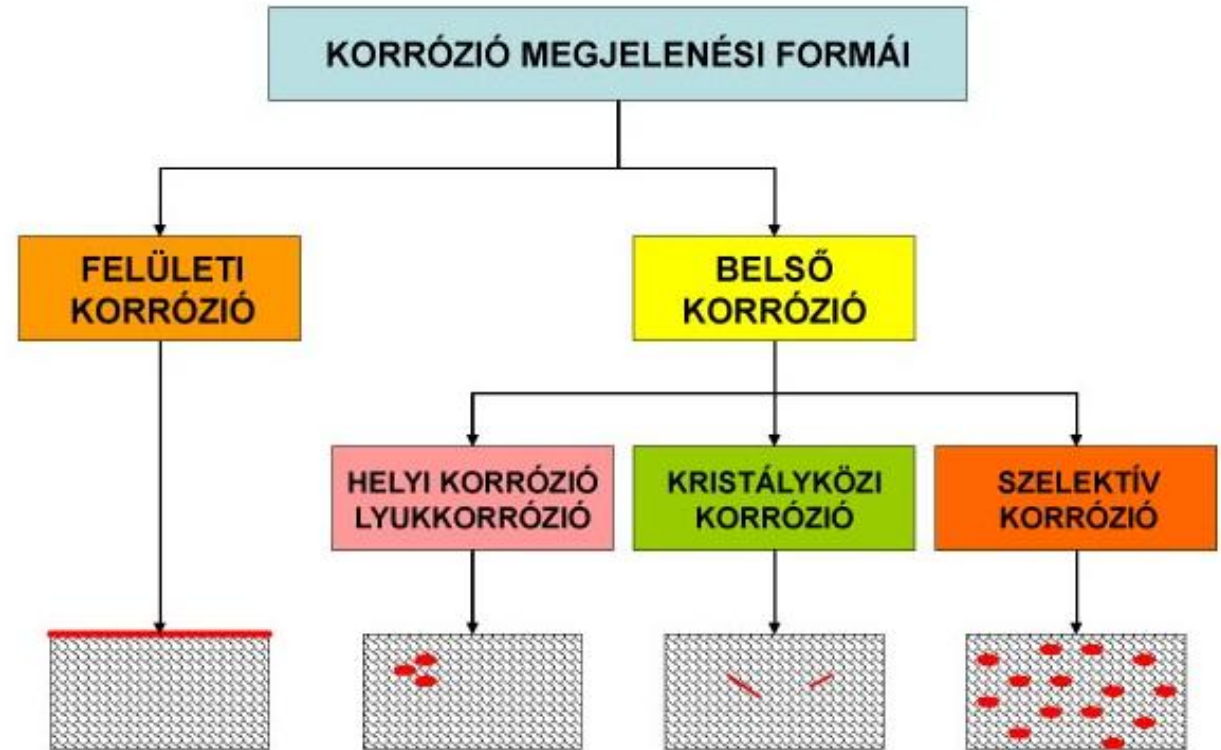
„A korrózió a fém és környezete közötti fizikai-kémiai kölcsönhatás, amelynek következtében a fém tulajdonságai megváltoznak, és gyakran bekövetkezik a fém, a környezet, illetve az ezekből álló műszaki rendszer funkcionális jellemzőinek a romlása.”

- Fémek felületéről indul – fémek belseje felé halad
- Környezeti hatás okozza



- Korróziós közegként nemcsak a levegő, talaj, vagy vizes közegek jöhetnek számításba, hanem akár szerves folyadékok, sóoldatok, folyékony fémek, gáz stb.
- Kémiai korrózió esetén a fém és a korróziós közeg között közönséges kémiai reakciók játszódnak le, amelyekre általában a heterogén kémiai folyamatok törvényszerűségei érvényesek
- Elektrokémiai korrózió esetén az oxidáció és a redukció térben elkülönítetten, a molekuláris méreteket meghaladó távolságban játszódik le. Az elektrokémiai korrózió a fém anódos oldódása vagy spontán elektrokémiai oldódás miatt következik be.

- Megjelenési forma szerint:
 - Egyenletes, felületi
 - Belső:
 - Lyukkorrózió (pitting, bemarkódásszerű, szivacsos)
 - Kristályszerkezeti (kristályközi, szelektív)
 - Korróziós repedések (feszültségi, fáradási)
 - Különleges korrózió fajták (felhólyagosodás, lemezes, filiform)
- Eloszlás szerint:
 - Általános
 - Helyi
- Korróziós alapfolyamatok szerint:
 - Kémiai (védőrétegek)
 - Elektrokémiai (standard és elektrolitos potenciál)
- Egyéb:
 - Eróziós (berágódásos, kavitációs)
 - Mikrobiológiai
 - Kontakt-, réskorrózió



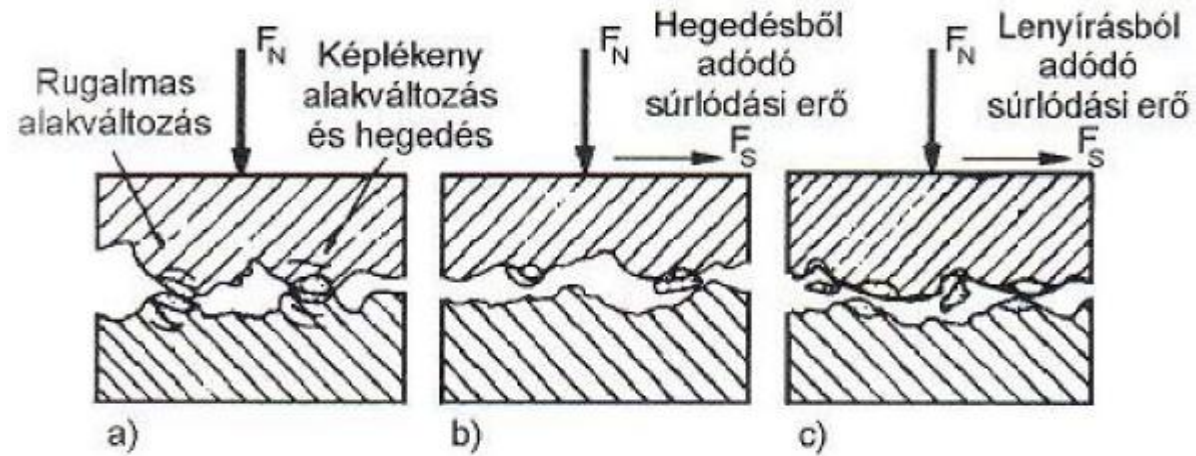
- Ötvöző és szennyező elemek
- Mikroszerkezet
- Gyártástechnológia (hegesztés, hőkezelés, hideg- és melegalakítás)
- Feszültségek, mechanikai igénybevételek
- Felületi állapot (pl. felületi érdesség)
- Korróziós környezet
- Rendszer hőmérséklete
- Közeg áramlása
- Felületek relatív csúszása (Fretting korrózió)
- Mikroorganizmusok hatása



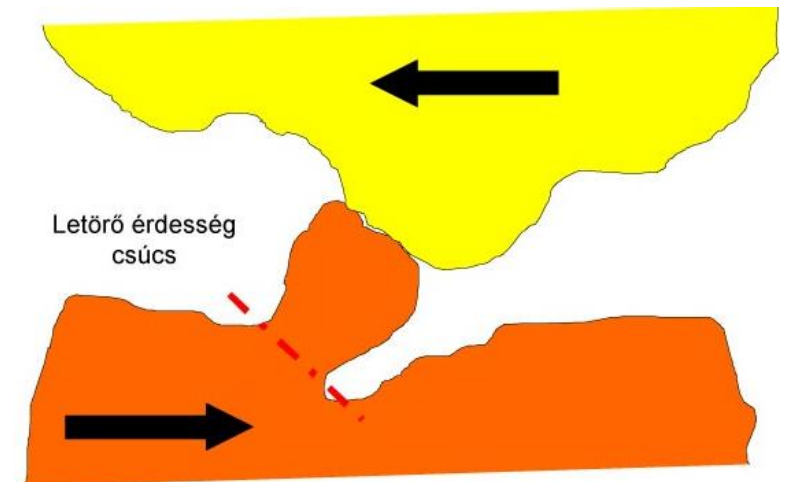
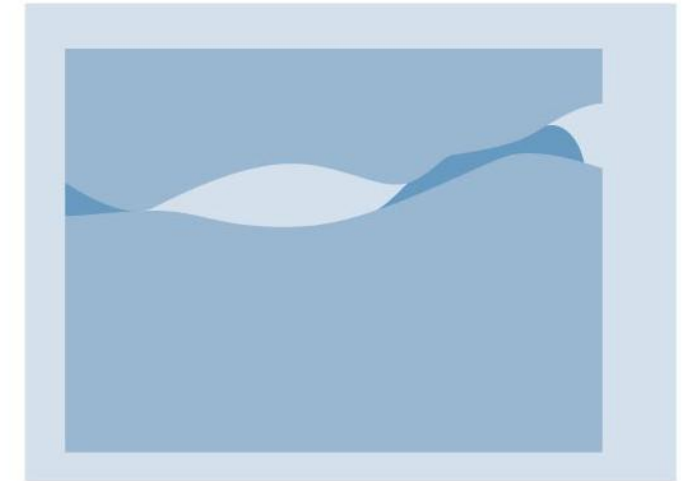
- Felületi réteg és környező közeg **kölcsönhatása**
- **Metallózis:** fémionok emberi szervezetbe kerülése
- Emberek 6%-a **hiperszenzitív** a korrózióálló acélok vagy a Co-Cr ötvözetek valamely összetevőjére

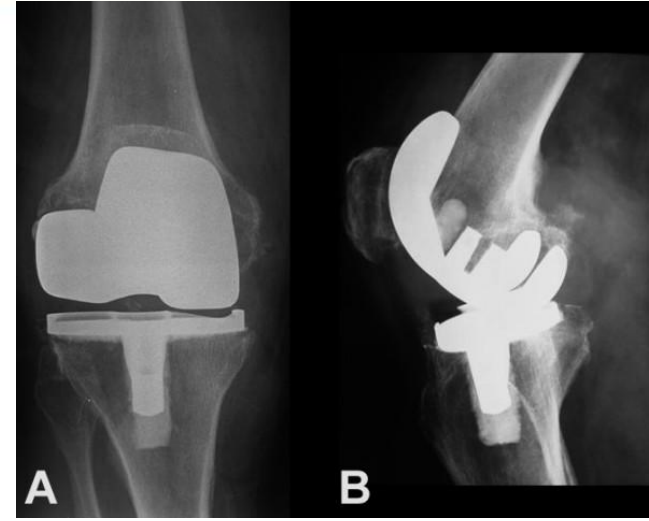
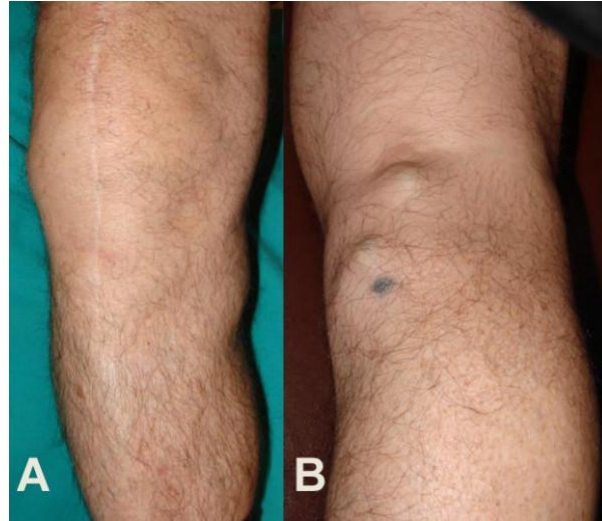


- A szilárd anyagok felületének anyagvesztesége, amelyet egyedül vagy más igénybevétellel társult mechanikai igénybevétel okoz.
- Kopási mechanizmusok:
 - Felületi fáradás (Hertz feszültség)
 - Abrázio (felületi érdesség, mikroforgácsolás)
 - Kemoszorpció (súrlódás és vegyi hatás)
 - Adhézió (azonos anyagpárosítás)

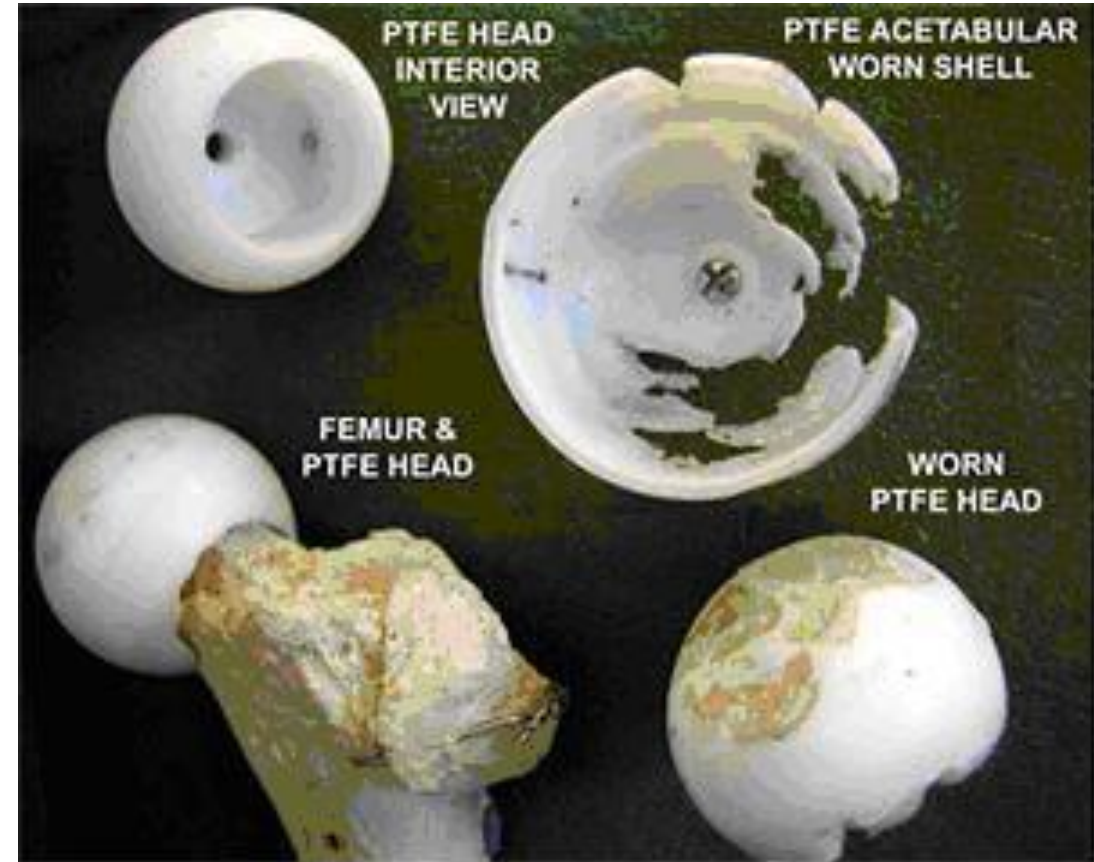


- Adhéziós kopás:
 - tényleges érintkezési felületen kialakuló adhéziós kapcsolatok elszakadásakor létrejövő anyagvesztés
 - megjelenési formái: berágódás, lyukak, pikkely, anyagátvitel, anyagkiszakadás
- Abráziós kopás:
 - benyomódó érdességcsúcs vagy kemény szemcse barázdát húz: a barázdából kinyomódó anyag, részben kopási részecske formájában leválik
 - megjelenési formái: rovátkolódás, kaparási nyom, vájat, hullámok, kráter
- Fáradásos kopás:
 - csúszás vagy gördülés során a felszíni réteg tartományában kialakuló ismétlődő tribológiai igénybevételek okozzák
 - megjelenési formái: repedés, gödrösödés, pitting, lehámlás





- Csípőimplantátumoknál leggyakrabban a vápa betét kopik el

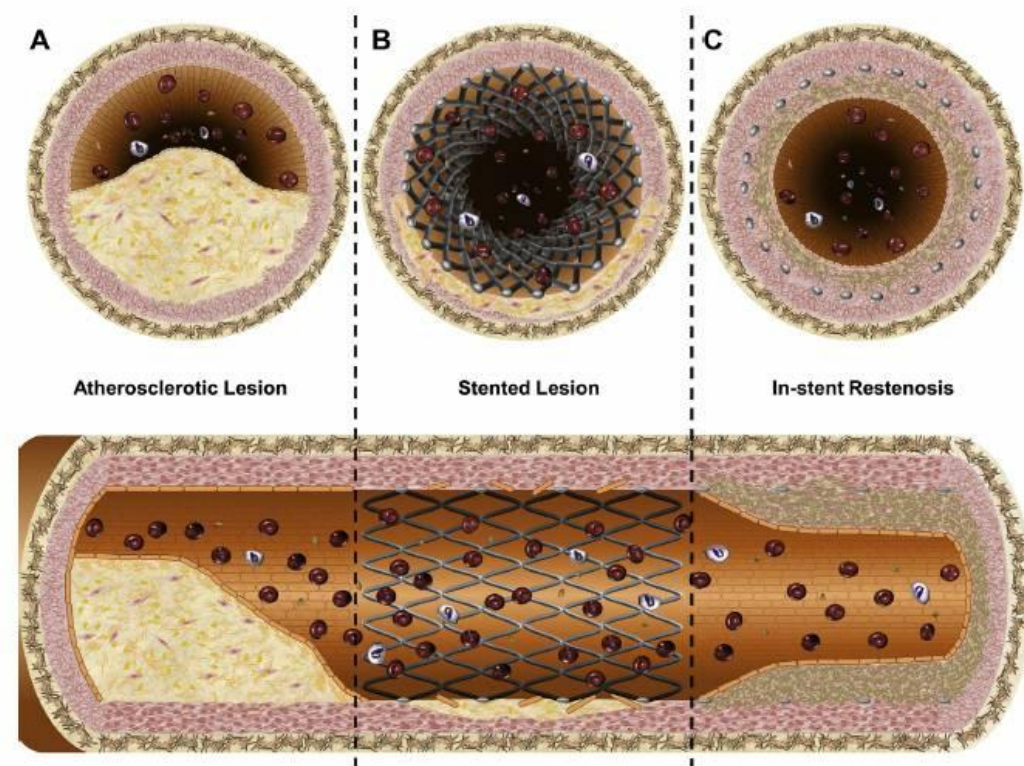
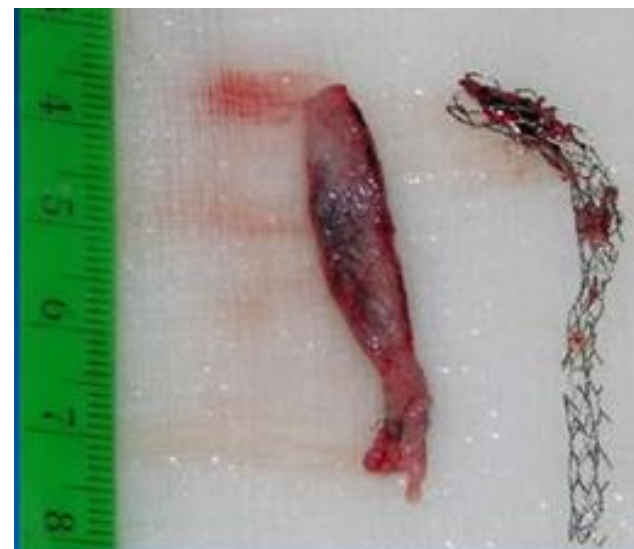
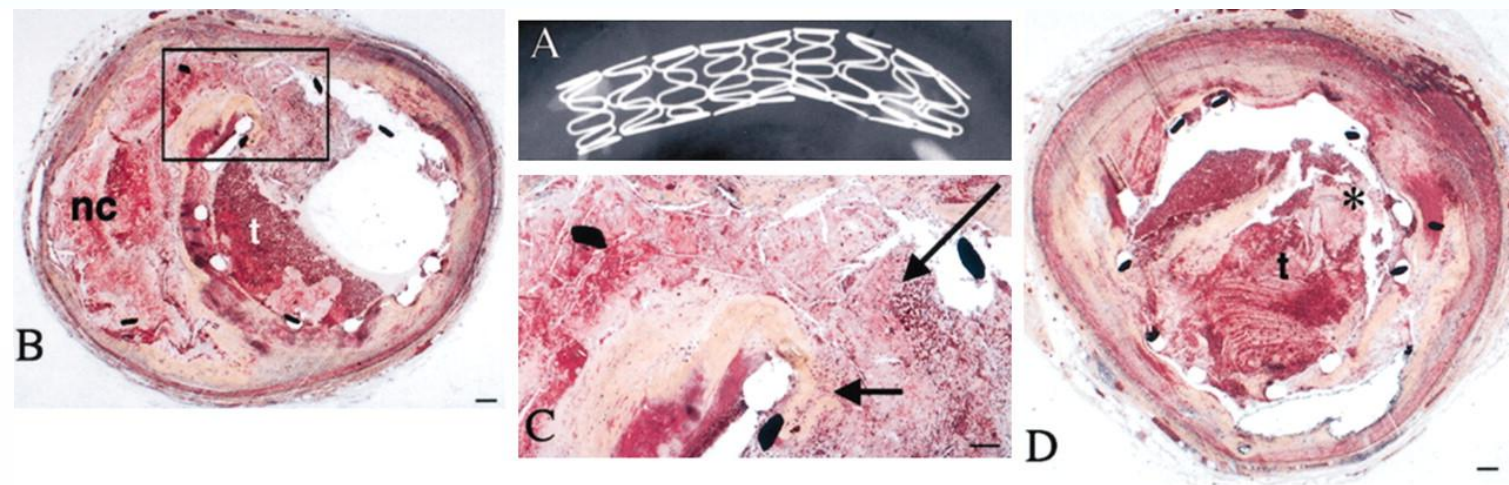


- Az anyagban igen lassan végbemenő kémiai és/vagy fizikai folyamatok következtében az anyagok tulajdonságainak többnyire kedvezőtlen változása.
- Fémeknél:
 - Öregedés: túltelített szilárd oldatból kiválások, nagyfrekvenciás rezgések hatására képlékeny anyagokban a feszültségmező megváltozása, sugárzások hatására ridegedés
- Polimereknél:
 - Oxigén és/vagy ibolyántúli sugárzás hatására depolarizáció
- Kerámiáknál:
 - Kiválások

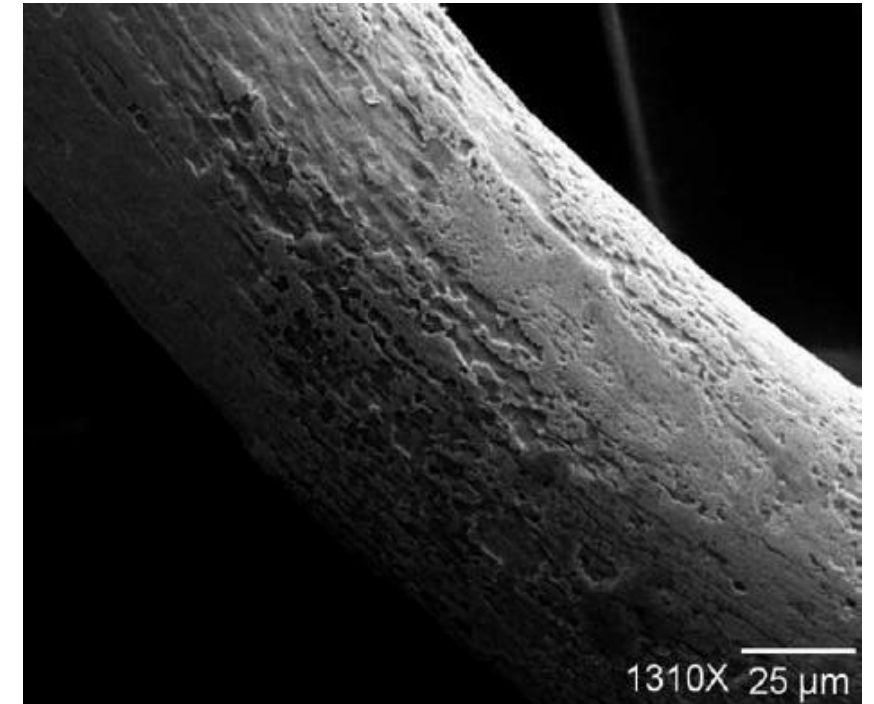
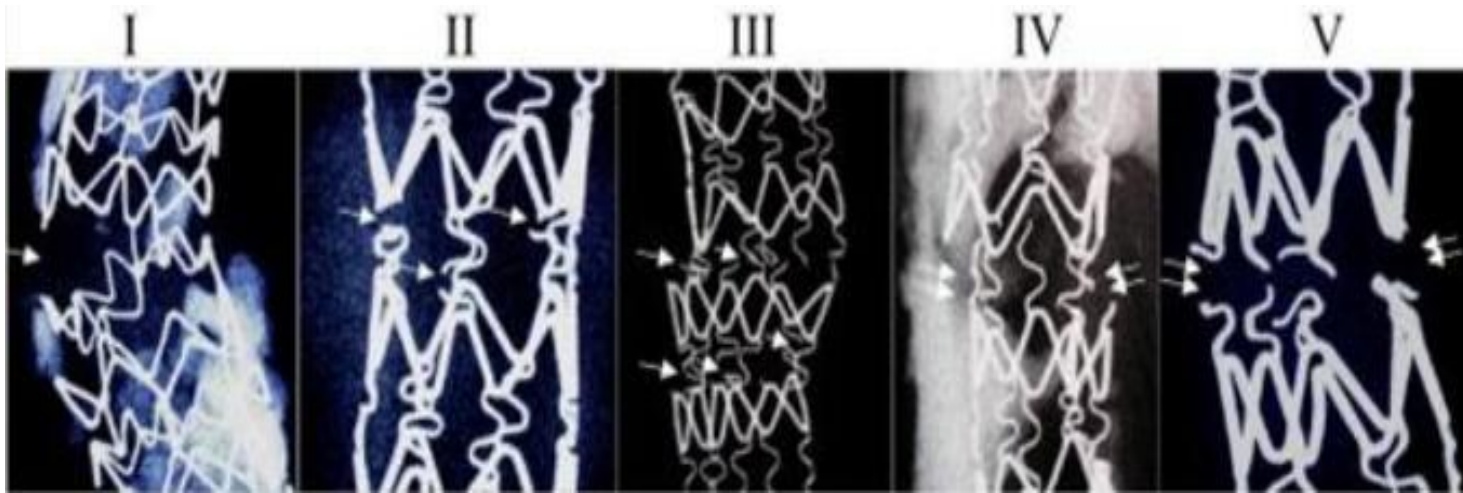
- A biológiailag lebontható fémek alapvető elve az, hogy olyan fémes elemeket tartalmaz, amelyek fiziológiás úton eltávolíthatók a testből, és amelyek a korróziós folyamat során a szervezetbe lépve nem lépik túl a toxicitási határértékeket
- Kezdeti próbálkozások tiszta ezüsstel és vassal, de mechanikai tulajdonságaik nem bizonyultak kielégítőnek
- A magnézium alapú ötvözetek ígéretes útnak számítanak, de a korrózió nehezen szabályozható folyamat

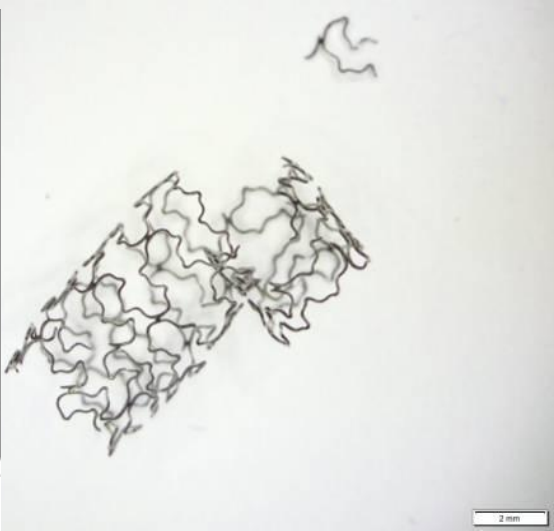
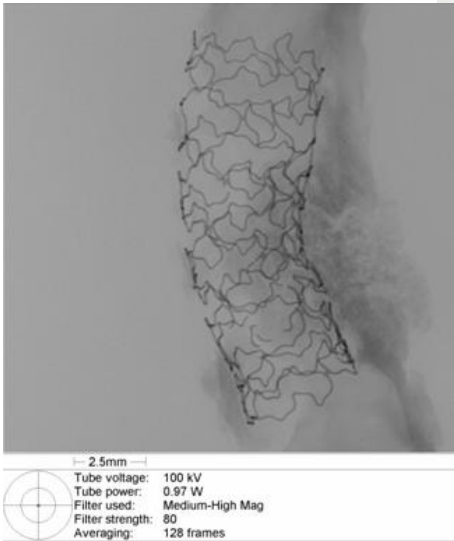
- Metallózis: kopás, korrózió, degradáció során
- Csontra ültethető implantátum: kilazulás, nem megfelelő osseointegráció, törés
- Ízületi implantátum: kopás és ebből adódó metallózis
- Endovaszkuláris implantátum: trombózis, restenózis
- Csontrögzítő lemezek és csavarok: törés (fáradás)
- Lebomló implantátumok: gyulladások
- Polimer implantátumok: sugárzás miatti leromlás, kizakadás, eresztes

- Resztenózis
- Trombózis



- Törés
- Korrózió





Törés

