


 Anyagtudomány és Technológia Tanszék
 

## Ötvözetek leromlási folyamatai 2.

### Kúszás Korrózió

Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat  
BMEGEMTBGA1

1

---

---

---

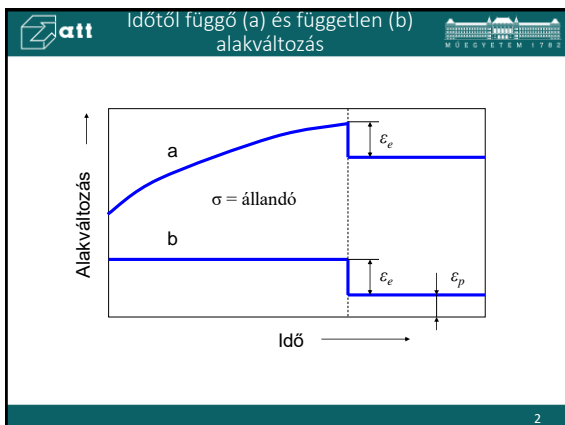
---

---

---

---

---



2

---

---

---



---

---

---

---

---


 Kúszás
 

- **Kúszás (tartósfolyás):** állandó terhelés hatására növekszik az anyag alakváltozása.
- **Kúszáshatár:** az a feszültség, amely végtelenül hosszú idő alatt sem okoz az előírtnál nagyobb alakváltozást. ( $\sigma_{T0,2}$ )
- **Tartamszilárdság:** az a feszültség, amely t idő alatt előírt  $\epsilon_t$  alakváltozást hoz létre. (pl.  $\sigma_{0,2/10^3}$ )
- A kúszás tipikusan nagy hőmérsékleten lejátszódó jelenség  $T > 0,4 T_{olv.}$
- **Mérnöki alkalmazás:** gázturbina üzemi hőmérséklete  $1300^\circ\text{C}$ , az utasszállító repülőgép leszállás nélkül átrepüli az óceánt.

3

3

---

---

---

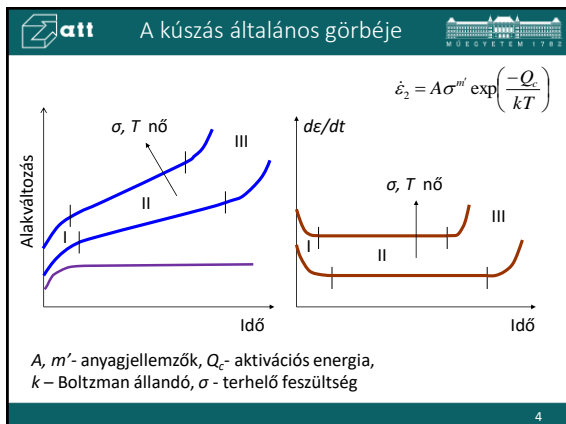
---

---

---

---

---



4

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** A kúszási görbe három szakasza 

**I. Elsődleges kúszás**  
 Az alakváltozási sebesség az idővel és az alakváltozással csökken. A diszlokáció sűrűség nő, a diszlokációs cellaméret csökken az idővel és az alakváltozással.

**II. Másodlagos kúszás (állandósult állapot)**  
 A keményedési és a megújulási folyamatok egyensúlyban vannak.

**III. Harmadlagos kúszás**  
 Rekrisztallizáció, a második fázisú részecskék durvulása kezdődik, az üregek és repedések kialakulása indul be.

5

5

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Kúszási mechanizmusok 

A kúszási folyamat megvalósulásában a feszültségtől és a hőmérséklettől függő különböző anyagszerkezeti folyamatok vesznek részt.

- A diszlokációs csúszás
- Diffúzió okozta alakváltozás
- Megújulás (diszlokációk mászása)

6

6

---

---

---

---

---


---

---

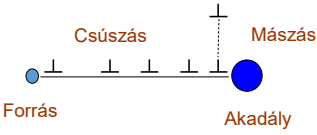
---

---

---

**att** Diszlokáció csúszás és mászás együttes hatása 

A képlékeny alakváltozás keményedést okoz.  
 Diszlokáció hálózat jön létre.  
 A keményedés és a megújulás (mászás) együttesen megy végbe.



7

7 

---

---

---

---

---


---

---

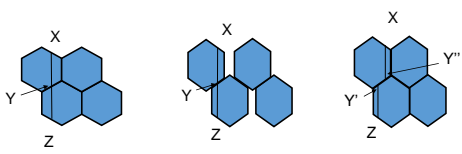
---

---

---

**att** Ponthibák diffúziója 

Ponthibák rendezett áramlása a szemcsehatárok mentén fejt ki a hatását.  
 A szemcsén belül alakváltozást, a határokon üregeket eredményez.  
 A szemcse határmenti elcsúszása csökkenti az üregeket.



8

8 

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Kúszásnak ellenálló anyagok tervezése 

**A kúszás általános egyenlete**

$$\dot{\epsilon}_i = A_i D_i \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{m'} \left(\frac{\sigma \Omega}{kT}\right) \left(\frac{b}{d}\right)^{n'}$$

*A<sub>i</sub>, m', n'* – anyagjellemző paraméterek, *D<sub>i</sub>* – diffúziós tényező  
*G* – csúsztató rugalmassági modulusz, *Ω* – atomtérfogat,  
*k* – Boltzman állandó, *b* – Burgers vektor abszolútértéke,  
*d* – szemcseméret, *T* – hőmérséklet

**Kúszási ellenállás növelhető (T = állandó) :**

- Diffúziós tényező csökkentésével → nagy olvadáspontú anyagok alkalmazása;
- Csúsztató rugalmassági modulusz növelésével;
- Szemcseméret növelésével → egykristály alkalmazása;
- Második fázisú kiválások létrehozásával;

9

9 

---

---

---

---

---


---

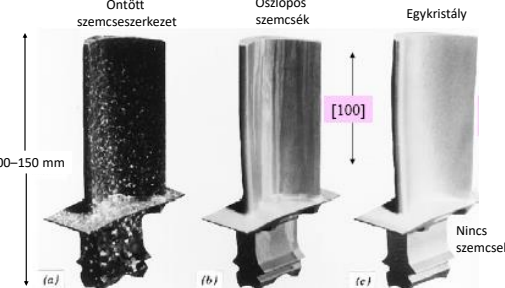
---

---

---

---

**att** Turbinalapát gyártása 



Öntött szemcseszerkezet      Oszlopos szemcsék      Egykristály

~100–150 mm

Szemcseméret ~1–2 mm      Irányított kristályosodás      Nincs szemcsehatár

10

10

---

---

---


---

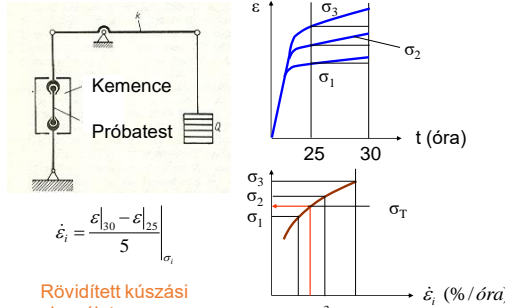
---

---

---

---

**att** Kúszási vizsgálatok 



Kemence      Próbatest

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{\epsilon|_{30} - \epsilon|_{25}}{5 \sigma_i}$$

Rövidített kúszási vizsgálat

11

11

---

---

---


---

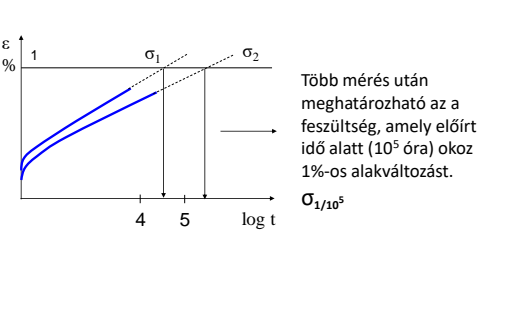
---

---

---

---

**att** Extrapoláció az állandósult szakaszból 



Több mérés után meghatározható az a feszültség, amely előírt idő alatt ( $10^5$  óra) okoz 1%-os alakváltozást.

$\sigma_{1/10^5}$

12

12

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Larsen - Miller eljárás 

$\dot{\epsilon} = A\sigma^m \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right)$

log  $\sigma$

mestergörbe

Mérési adat	L-M extrapoláció
500 °C 1000 óra	450 °C, t= 39000 óra
	550 °C, t= 40 óra
	600 °C, t= 2.3 óra
	650 °C, t= 0.01 óra

$T_1(\log t_1 + C) = T_2(\log t_2 + C) = P$

$\sigma_p/\sigma_u$

$T_u, t_u, \sigma_u \rightarrow \epsilon \leftarrow T_p, t_p, \sigma_u \text{ LMP}(\sigma_u)$

$\leftarrow T_p, t_p, \sigma_p \text{ LMP}(\sigma_p)$

$T_p = T_u + \max. 50^\circ C$

13

13

---

---

---

---

---

---

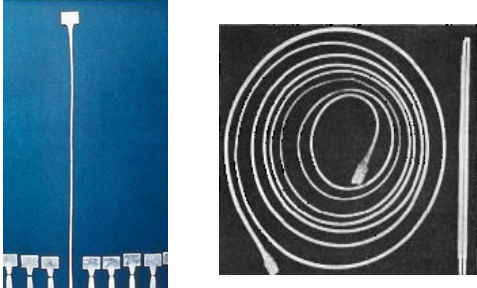
---

---

---

---

**att** Szuperképlékeny alakváltozás 



14

14

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** A szuperképlékenység feltételei 

A szuperképlékenység jelensége fellép, ha a szemcsenagyság kisebb, mint **10  $\mu\text{m}$** , az alakváltozási sebesség a  **$10^{-5}$ – $10^{-1}/\text{s}$**  intervallumba esik, és a hőmérséklet nagyobb mint **0,5  $T_m$** , ahol  $T_m$  az adott anyag olvadáspontja Kelvinben.

A szuperképlékeny alakváltozásra jellemző, hogy a folyási feszültség alacsony, és az anyag nagymértékű egyenletes alakváltozásra képes. Emiatt alkatrészek gyártására jól használható.

15

15

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** A szuperképlékenység mechanikai jellemzői 

A szuperképlékeny anyag egyik legfontosabb mechanikai jellemzője a nagy alakváltozási sebesség érzékenység.

$$\sigma = k\dot{\epsilon}^m$$

Ha az anyag szuperképlékenységre hajlamos, akkor a sebességkitevő  $m > 0.5$ . Legtöbb szuperképlékeny anyagnál a sebességkitevő 0.4-0.8 közé esik. Minél nagyobb az  $m$  értéke annál inkább ellenáll az anyag a lokális instabilitás fellépésének, és ennek következtében nagymértékű egyenletes megnyúlás jön létre.

16

16

---

---

---


---

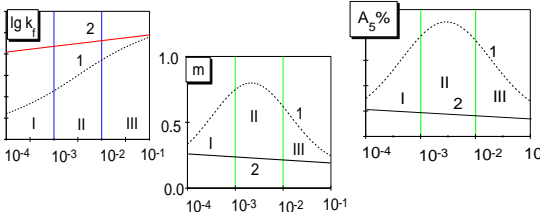
---

---

---

---

**att** Finomszemcsés (1) és durvaszemcsés (2) anyag mechanikai tulajdonságai 



az alakváltozási sebesség függvényében

17

17

---

---

---


---

---

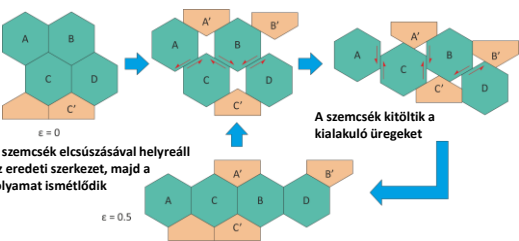
---

---

---

**att** Szuperképlékeny folyás 

**Szemcsehatármenti elcsúszás**



$\epsilon = 0$   
A szemcsék elcsúszásával helyreáll az eredeti szerkezet, majd a folyamat ismétlődik

$\epsilon = 0.5$   
A szemcsék kitéltik a kialakuló üregeket

18

18

---

---

---

---


---

---

---

---



**att** Előnyök-1 

**Kis szerszámozási költség**  
Egyszerű, öntött szerszámok alkalmazásával jelentősen csökkenteni lehet a szerszámozás költségét.

**Nagy panelek**  
Nagyméretű, bonyolult geometriájú panelek előállítására 3000mm x 2000mm x 600mm méretig.

**Utólagos alakítás**  
Szuperképlékeny alakítás után az anyag visszanyeri a szobahőmérsékletre jellemző tulajdonságait, és lehetőség van viszonylag nagymértékű befejező alakító műveletek végzésére.

**Kiváló felületi minőség**  
Bizonyos eljárásoknál a panelfelületek nem érintkeznek a szerszámmal, emiatt jó felületi minőség érhető el (gáznyomás alkalmazása).

22

22

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Előnyök-2 

- Nincs visszarugózás
- Nincs maradó feszültség – emiatt a szerelés sokkal egyszerűbb
- Hosszú szerszám élettartam
- Az elemek számának csökkentése – egy panel több elem feladatát valósítja meg
- Súlycsökkentés – nagyszilárdságú anyag alkalmazásával, a szerkezeti elemek összevonásával
- Jó felületi minőség (Lüders vonalak, szerszámnyomok megszűnése)
- Pontos szerszámozás – jó illeszkedés
- Gyakorlatilag megszűnnek a karcok
- A hagyományos alakításhoz képest bonyolultabb geometriájú alkatrészek előállítására.

23

23

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Vasút 



Ablak panel      Mozdony panel      Ülések

24

24

---

---

---

---

---

---


---


---

---

---



**att** Autó 



Ajtó panel Hűtő borítás

Hátsó sárvédő Karosszéria elemek

25

---

---

---

---

---

---

---

---

25

**att** Repülőgép 



Szárnyvég elemek Csomagtároló ajtó

Burkoló elem Hőre lágyuló kompozit elem

26

---

---

---

---


---


---

---

---

26

**att** Építészet 



Földalatti panelek Sarokelemek

Dekoratív borítások

27

---

---

---

---

---

---

---

---

27

**att** Tervezés MŰEGYTEM 1782



Kerékpárváz

28

28

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Fogalmak MŰEGYTEM 1782

- Az időtől függő és független alakváltozás
- Kúszáshatár, tartamszilárdság
- A kúszási görbe és szakaszai
- A kúszás anyagszerkezeti mechanizmusai
- A kúszási ellenállás növelésének módjai
- Rövidített kúszási vizsgálat
- A szuperképlékenység fogalma és feltételei.
- A szuperképlékenység mechanizmusa
- Szuperképlékeny anyagok feldolgozása
- A szuperképlékeny alakító eljárások előnyei

29

29

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Korrózió MŰEGYTEM 1782

**IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)**  
A korrózió valamely anyagnak (fémnek, kerámiának, polimernek) a környezetével való irreverzibilis határfelületi reakciója (kölcsonhatása), melynek eredményeképpen vagy az anyag fogy el fokozatosan, vagy a környezet valamely alkotórésze épül be az anyagba.

**MSZ EN ISO 8044:2003**  
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.

A szerkezeti anyag és a környezet közötti kölcsönhatás szerint megkülönböztetünk: **elektrokémiai** és **kémiai** korróziót.

30

30

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** A korrózió alaptípusai 

- Elektrokémiai korrózió
- Kémiai korrózió

• Mindkét esetben egy anódos oxidáció és egy katódos redukció történik:

- elektrokémiai korróziónál térben elkülönülten
- kémiai korróziónál egy helyen

31

31

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Elektrokémiai korrózió 

- Elektrokémiai korrózió játszódik le, amikor a fém egy ion-vezető közeggel, általában vizes elektrolittal kerül kapcsolatba, melyben a fémionok oldódni képesek. Az alapfolyamat minden esetben legalább egy anódos oxidáció és egy katódos redukció.

Katódos redukció:

- hidrogénionok töltésvesztése  
 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- vízbontás  
 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$
- vízben oldott oxigén redukciója, amely:
  - savas közegben (pH<7)  
 $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$
  - semleges és lúgos közegben (pH≥7)  
 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \leftrightarrow 4\text{OH}^-$

Anódos oxidáció:

- $\text{Me} \rightarrow \text{Me}^{2+} + 2\text{e}^-$

32

32

---

---

---


---

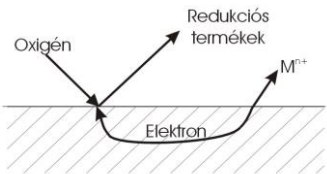
---

---

---

---

**att** Elektrokémiai korrózió 



Az oxidációs és redukciós folyamat térben elválasztva, egymástól bizonyos távolságban játszódik le, helyi galváncella létrehozásával.

33

33

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Standardpotenciál MŰEGYETEM 1782

- Ha egy fém a saját ionjait tartalmazó oldatba merül, akkor a fémből fémionok lépnek az oldatba, és az oldatból színfém válik ki, egyensúlyi mennyiségben.
- A fém felülete és az oldat között elektromos potenciálkülönbség jön létre.
- Ezt a potenciálkülönbséget a hidrogénelektrodhoz képest adják meg, ez a normál- vagy standardpotenciál.
- Azok a fémek, amelyek több iont bocsátanak vizes oldatba, mint a hidrogén, könnyebben oldódnak, és a hidrogénhez képest negatívabb potenciál lesz a felületükön. Ezeknek negatív a standardpotenciáljuk (pl. Zn).
- Azok a fémek, amelyek kevesebb iont bocsátanak vizes oldatba, mint a hidrogén, nehezebben oldódnak, és a hidrogénhez képest pozitívabb potenciál lesz a felületükön. Ezeknek pozitív a standardpotenciáljuk (pl. Cu).

34

34

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Standard hidrogénelektrod MŰEGYETEM 1782

A standard hidrogénelektrod 1 mol/dm<sup>3</sup> koncentrációjú oxóniumion (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) oldatba merülő platinalemez. Működés közben az oldatban 0,1 MPa nyomású 25°C-os hidrogéngázt buborékoltatnak keresztül. Az elektrod reakcióiban nem a platina, hanem a hidrogén vesz részt, ezért nevezik hidrogénelektrodnak. A platina szerepe részben az, hogy a hidrogéngázt H-atomok formájában oldja, s így a hidrogén mintegy "fémes" állapotba jutva, részt tud venni az elektrodreakcióban, másrészt a platina adja meg az elektromos csatlakozást. Tehát az elektronleadás - elektronfelvétel a H<sub>2</sub>/2H<sup>+</sup> rendszer között történik a fém/fémion rendszerhez hasonlóan.

A hidrogénelektrodon az alábbi félcella-reakciók játszódhatnak le:

$$\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \quad (\text{elektronleadás, oxidáció})$$

vagy

$$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) \quad (\text{elektronfelvétel, redukció})$$

Azt, hogy a fenti két félcella-reakció közül melyik játszódik le, a H-elektroddal összekapcsolt másik elektrod elektronleadó képessége (potenciálja) határozza meg. A hidrogénelektrod standardpotenciálja definíciószerűen 0,00V.

35

35

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** A réz standardpotenciáljának meghatározása MŰEGYETEM 1782

anode(-) H<sub>2</sub> platinum electrode H<sup>+</sup>(aq) Oxidation H<sub>2</sub>(g) → 2H<sup>+</sup>(aq) + 2e<sup>-</sup>

cathode(+) Cu Cu<sup>2+</sup>(aq) Reduction Cu<sup>2+</sup>(aq) + 2e<sup>-</sup> → Cu(s)

36

36

---

---

---

---

---

---


---

---

---

---



**att** A galváncella elektromotoros ereje 

- $E_{\text{Zn}} = -0,763 \text{ V}$
- $E_{\text{Cu}} = +0,337 \text{ V}$
- $E_{\text{cella}} = E_{\text{Cu}} - E_{\text{Zn}} = 0,337\text{V} - (-0,763\text{V}) = 1,1 \text{ V}$

Minél nagyobb a cella elektromotoros ereje, annál gyorsabban megy végbe az oxidációs/redukciós folyamat.

**Elektrokémiai korrózió során tehát a fém felületén egy galváncella jön létre.**

40

40

---

---

---


---

---

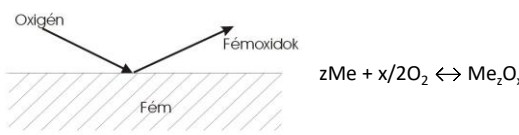
---

---

---

**att** Kémiai korrózió 

A kémiai korrózió a fémek és ötvözetek felületén lejátszódó olyan folyamat, ahol a fém oxidációja és a korróziós közeg oxidáló komponensének redukciója egy lépésben, egy helyen megy végbe.



Oxigén

Fémoxidok

Fém

$z\text{Me} + x/2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{Me}_2\text{O}_x$

41

41

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Kémiai korrózió 

- A kémiai korrózióval szemben a különböző ötvözetek érzékenységet, ill. ellenállását a szabadenergia-különbségen kívül elsősorban az szabja meg, hogy a keletkezett vegyület (korróziótermék) képes-e olyan összefüggő, tömör réteget képezni a határfelületen, amely a fémet a külső korrrodáló közegtől mintegy elválasztva, csökkenti az eredő korróziós sebességet.
- Ilyen esetekben a károsodási folyamat előrehaladását a kémiai reakcióban részt vevő elemek korróziós rétegbeni diffúziós sebessége irányítja.
- Az először keletkezett reakciótermékek a változó környezeti feltételek (pl. hőmérséklet-ingadozás) hatására összetételükben és szerkezetükben is megváltozhatnak. Így keletkezik például az acélok revéjének réteges szerkezete.

42

42

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** A korrózió megjelenési formái 

Elektrokémiai korrózió	Kémiai korrózió
<ul style="list-style-type: none"> <li>Egyenletes korrózió</li> <li>Galvánkorrózió</li> <li>Réskorrózió</li> <li>Lyukkorrózió</li> <li>Szemcsehatármenti korrózió</li> <li>Szelektív korrózió</li> <li>Mechanikai igénybevétellel párosuló korrózió (eróziós, ütközési és kavitációs korrózió, berágódásos, vagy súrlódási korrózió)</li> <li>Feszültségi korrózió (beleértve a korróziós kifáradást)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nagy hőmérsékletű korrózió</li> <li>Sóolvadékokban lejátszódó korrózió</li> <li>Fémolvadék okozta korrózió</li> </ul>

43

43

---

---

---


---

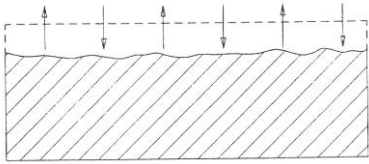
---

---

---

---

**att** Egyenletes korrózió 



Az anódos és katódos részreakciók a felületen vándorló anódos és katódos jellegű területeken váltakozva mennek végbe → egyenletes fogyás

44

44

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Egyenletes korrózió 

Egyenletes korrózió tárolótartály külső és belső felületein



45

45

---

---

---


---

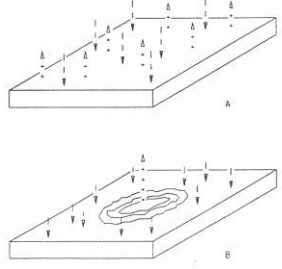
---

---

---

---

**att** Helyi korrózió 



Az anódos és katódos reakciók létrejöttének valószínűsége nem azonos a felület minden pontján.

46

46

---

---

---


---

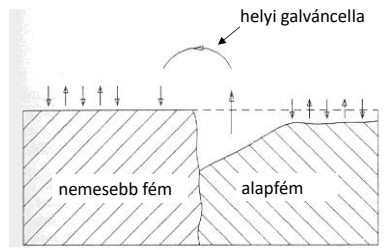
---

---

---

---

**att** Galvánkorrózió 



helyi galvancia

nemesebb fém

alapfém

47

47

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Galvánkorrózió 

Rozsdamentes acél lemezeket rögzítő horganyzott alátét és csavar galvanizációs károsodása

Különböző anyagminőségek párosítása tárolótartály tetőcsomkon



48

48

---

---

---

---


---

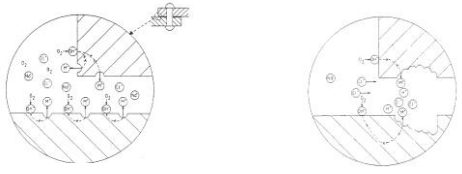
---

---

---



**att** Réskorrózió 



anódreakció:  
 $M \rightarrow M^+ + e^-$

katódreakció:  
 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

A résben lecsökken az oxigénkoncentráció, így a pozitív töltéstöbbletet a jelenlévő  $Cl^-$  ionok kompenzálják.

$M^+Cl^- + H_2O \rightarrow MOH \downarrow + H^+Cl^-$

Sósav keletkezik, amely további korróziót generál.

49

49

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Szemcsehatármenti korrózió 



50

50

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Szemcsehatármenti korrózió 

- A kristallithatáron lévő, a kristályosodás utolsó részfolyamatában megdermedt, kis olvadáspontú, nagy rácshiba-sűrűségű, a kristallit anyagánál legtöbbször elektropozitívabb szennyeződés (pl. króm-karbid) sok esetben hajlamos elektrokémiai oldódásra, miközben a kristallitok közötti szilárdtest kapcsolat lényegében megszűnik
- Erősen hajlamosak a kristályközi korrózióra a ferrites és ausztenites rozsdamentes acélok
- Védekezés: meg kell akadályozni a karbon szemcsehatár-menti kiválását, pl. Ta, Ti vagy Nb stabilizátorokkal

51

51

---

---

---

---

---

---

---

---

 Feszültségi korrózió 



Feszültségkorróziós repedések hegesztési varrat környezetében Szénacél, 15 év üzemi idő, gáztalanító

52

52

---

---

---



---

---

---

---

---

 A feszültségi korrózió kialakulásának feltételei 

- a szerkezeti anyag hajlamossága
- a korróziós közeg, amely ezt a fajta korróziót képes kiváltani
- elegendő nagyságú mechanikai húzófeszültség jelenléte
- elegendő idő (az inkubációs idő akár több hónap is lehet)

53

53

---

---

---

---

---

---

---

---

 Feszültségi korrózió 



Szénacél lúg hatására bekövetkező szemcsehatármenti korróziója

54

54

---

---

---


---

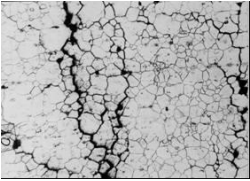
---

---

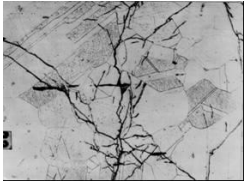
---

---

**att** Feszültségi korrózió 



Interkristallin repedésterjedés



Transzkristallin repedésterjedés

55

55

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Nagy hőmérsékletű korrózió 



Hidrogén hatására bekövetkező, nagy hőmérsékletű korrózió  
Perlit kiválás és mikrorepedések a szövetszerkezetben (szénacél)

56

56

---

---

---

---

---

---

---

---