



MISKOLCI
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC



Nagyszilárdságú acélok és hegesztett kötéseik ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállása

Prof. Dr. Lukács János – Dr. Pap Judit
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar,
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Korszerű Anyagok Hegeszthetősége Ankét
Miskolci Egyetem
Miskolc, 2025. március 20.

- ✓ **Bevezetés**
- ✓ **A vizsgált hegesztett kötések**
 - Alapanyagok és hozaganyagok
 - Alapanyag – hozaganyag párosítások
 - Hegesztéstechnológia
- ✓ **Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF)**
- ✓ **Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok (FCG)**
- ✓ **Következtetések**

- ✓ **Bevezetés**
- ✓ **A vizsgált hegesztett kötések**
 - Alapanyagok és hozaganyagok
 - Alapanyag – hozaganyag párosítások
 - Hegesztéstechnológia
- ✓ **Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF)**
- ✓ **Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok (FCG)**
- ✓ **Következtetések**



Alkalmazási példák

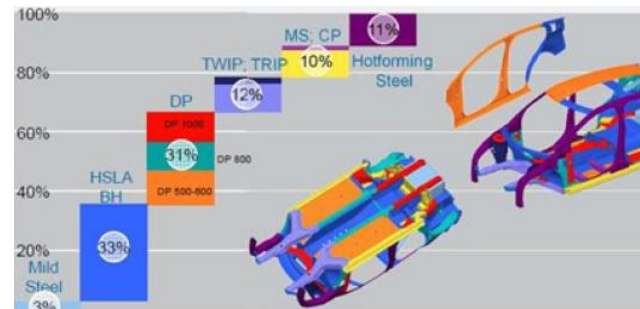


<https://vistapointe.net/bayonne-bridge.html>; <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14297>; <https://news.cision.com/ssab/r/record-breaking-450-tonne-dump-truck-from-belaz-finalist-for-swedish-steel-prize-2014,c9679068>; <https://www.xcmgmachinery.com/tt/xcmg-classical-k.html>; <https://jpt.spe.org/decreased-investment-online-pipelines-cause-lag-installation-end-decade>



Bevezető megjegyzések

✓ A téma a durvalemezek világa – nem autó karosszéria (nem „car body”)



✓ Kihívások

- erőforrás gazdálkodás → költségcsökkentés → üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése
- szilárdságnövelés → szelvényméret csökkenés → tömegcsökkenés
- szelvényméret csökkenés → stabilitás veszteség

- ✓ **Bevezetés**
- ✓ **A vizsgált hegesztett kötések**
 - **Alapanyagok és hozaganyagok**
 - **Alapanyag – hozaganyag párosítások**
 - **Hegesztéstechnológia**
- ✓ **Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF)**
- ✓ **Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok (FCG)**
- ✓ **Következtetések**



Az alapanyagok mechanikai tulajdonságai

Alapanyag	Gyártói jel	t (mm)	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	R _{p0.2} /R _m (–)	A (%)	CVN -40 °C (J)
S690QL	Optim 700QL	30	809	850	0.952	17	106
S960QL	Weldox 960E	15	1014	1053	0.963	14	75
S960M	alform 960M	15	1051	1058	0.993	17	177
S1100M	alform 1100 x-treme	15	1193	1221	0.977	11.6	88
S1300Q	N/A	10	1300	1560	0.833	12	78

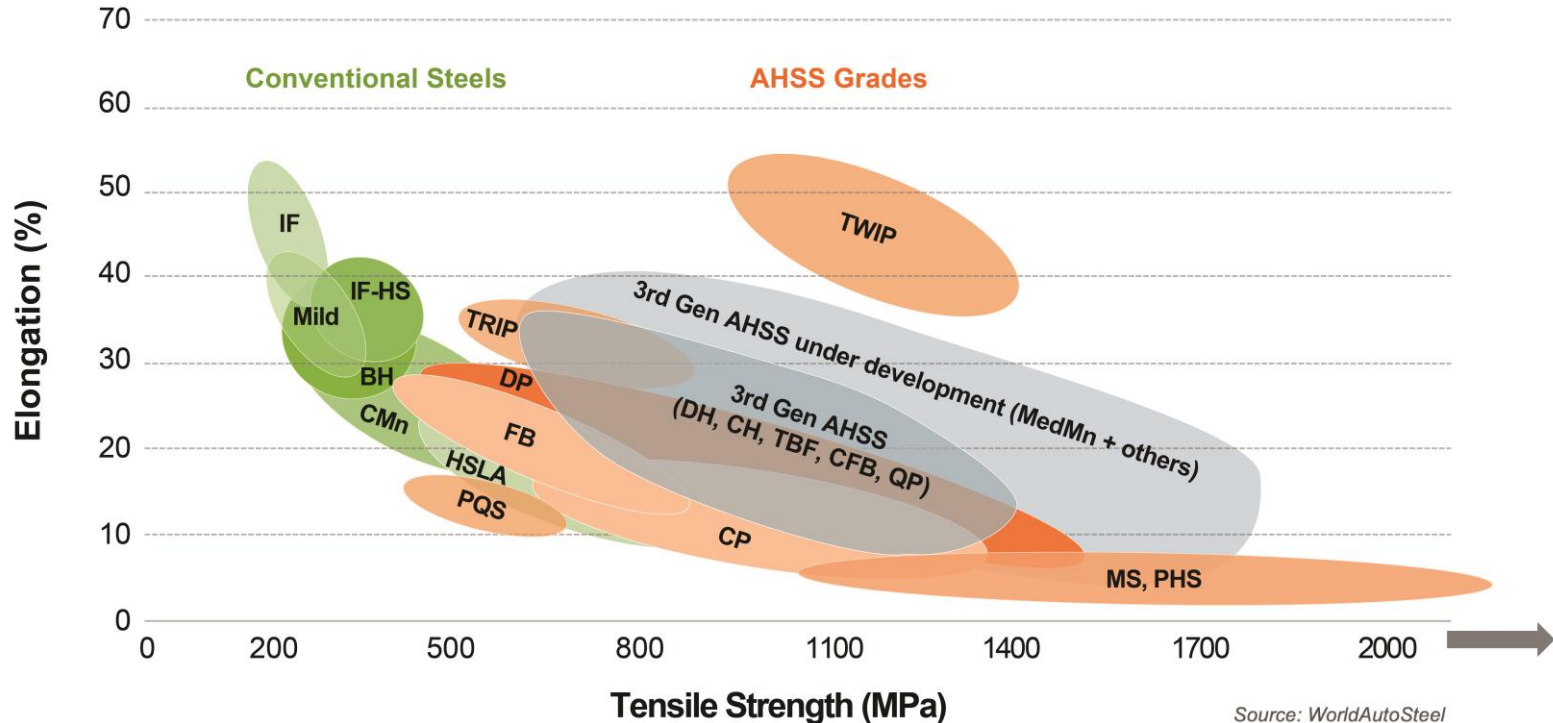


Az alapanyagok kémiai összetétele (tömeg%)

Alapanyag	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
S690QL	0.160	0.310	1.010	0.010	0.001	0.610	0.210	0.205
S960QL	0.17	0.23	1.23	0.011	0.001	0.20	0.04	0.588
S960M	0.084	0.330	1.650	0.011	0.0005	0.610	0.026	0.290
S1100M	0.127	0.319	1.620	0.009	0.0015	0.630	0.320	0.620
S1300Q	0.23	0.45	1.86	0.012	0.001	0.85	2.43	0.360
Alapanyag	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	Zr
S690QL	0.10	0.16	0.15	0.041	0.001	0.002	0.003	N/A
S960QL	0.041	0.004	0.01	0.061	0.017	0.001	0.002	N/A
S960M	0.078	0.014	0.016	0.038	0.035	0.0015	0.006	N/A
S1100M	0.066	0.011	0.047	0.035	0.037	0.0014	0.0042	N/A
S1300Q	0.030	0.002	0.093	0.063	<0.001	N/A	N/A	<0.001



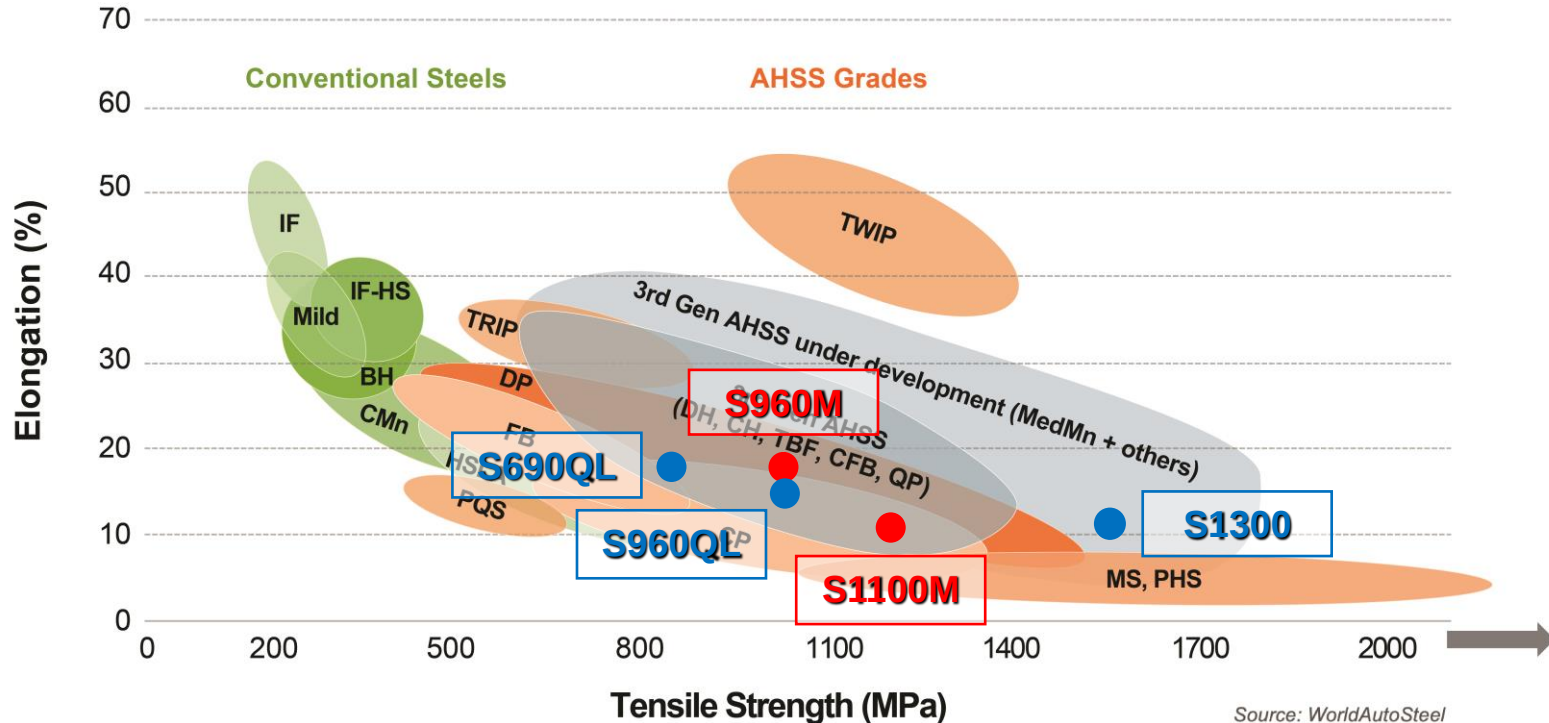
A „banán görbe” („banana curve”)



Source: WorldAutoSteel



A „banán görbe” („banana curve”)



Source: WorldAutoSteel



A hozaganyagok mechanikai tulajdonságai

Gyártói jel	Szabványos jel	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	CVN (J)
INE INEFIL NiMoCr	G 69 4 M Mn3Ni1CrMo*	≥ 750	≥ 820	≥ 19.0	-40 °C: ≥ 60
ESAB OK Tubrod 14.03	T 69 4 Mn2NiMo M M 2 H5**	757 [#]	842 [#]	20 [#]	-40 °C: 71 [#]
Böhler Union X85	G 79 5 M Mn4Ni1,5CrMo*	≥ 790	≥ 880	≥ 16.0	-50 °C: ≥ 47; 20 °C: ≥ 90
Böhler Union X90	G 89 6 M Mn4Ni2CrMo*	≥ 890	≥ 950	≥ 15.0	-50 °C: ≥ 47
Böhler Union X96	G 89 5 M Mn4Ni2,5CrMo*	≥ 930	≥ 980	≥ 14.0	-50 °C: ≥ 47; 20 °C: ≥ 80
Böhler alform 1100 L-MC	TZ2T15-1M21A-N4C1M2-H5**	1120 ≥ 1100	1160 [#] N/A	12.0 [#] ≥ 10.0	-40 °C: 40 [#] ; -20 °C: ≥ 45 [#] -40 °C: ≥ 27; -20 °C: ≥ 27

Jellemző érték (védőgáz: M21)

* MSZ EN ISO 16834:2012: Welding consumables. Wire electrodes, wires, rods and deposits for gas shielded arc welding of high strength steels. Classification.

** MSZ EN ISO 18276:2017: Welding consumables. Tubular cored electrodes for gas-shielded and non-gas-shielded metal arc welding of high-strength steels. Classification.



A hozaganyagok kémiai összetétele (tömeg%)

Gyártói jel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al
INE INEFIL NiMoCr	0.08	0.50	1.60	N/A	N/A	0.30	1.50	0.25	0.09	N/A	N/A
ESAB OK Tubrod 14.03	0.07	0.50	1.60	N/A	N/A	N/A	2.25	0.56	N/A	N/A	N/A
Böhler Union X85	0.07	0.68	1.62	0.010	0.010	0.29	1.73	0.61	<0.01	0.08	<0.01
Böhler Union X90	0.1	0.8	1.8	N/A	N/A	0.35	2.3	0.60	N/A	N/A	N/A
Böhler Union X96	0.1	0.81	1.94	0.015	0.011	0.52	2.28	0.53	<0.01	0.06	<0.01
Böhler alform 1100 L-MC	0.09	0.4	1.4	N/A	N/A	0.7	2.7	0.5	0.22	N/A	N/A



Az alapanyag – hozaganyag párosítások (mismatch)

Alapanyag	Hozaganyag	Párosítás
S690QL	NiMoCr	matching (M)
S690QL	Union X85	matching (M)
S690QL	Union X90	overmatching (OM)
S690QL	Union X85 / Union X90	matching (M) / overmatching (OM)
S960M	Union X96	matching (M)
S960M	Union X90	undermatching (UM)
S960M	OK Tubrod 14.03	undermatching (UM)
S960QL	Union X96	matching (M)
S1100M	Union X96	undermatching (UM)
S1100M	alform 1100 L-MC	matching (M)
S1300Q	Union X96	undermatching (UM)
S1300Q	alform 1100 L-MC	undermatching (UM)



Az alkalmazott VFI jellegzetességei

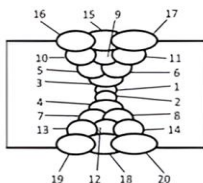
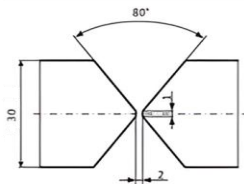


- ✓ **Hegesztő áramforrás: DAIHEN VARSTROJ WELBEE P500L**
- ✓ **Hegesztő traktor: ESAB Miggytrac B5001**
- ✓ **Védőgáz: M21 (18% CO₂ + 82% Ar)**
- ✓ **Hozaganyag: 1.2 mm átmérőjű tömör huzal**
- ✓ **Próbadarab méretek: 300 mm x 125 / 150 mm**
- ✓ **A varratvázat feltöltése:**
 - **gyök: minősített hegesztő, kézi hegesztéssel**
 - **további rétegek: gépesített hegesztés**
 - **forgatás: minden réteg elkészítése után**

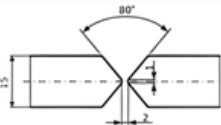


Az alkalmazott VFI jellegzetességei

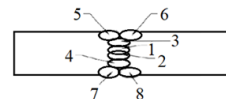
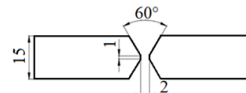
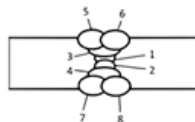
S690QL



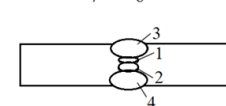
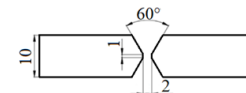
S960QL



S960M



S1100M



S1300

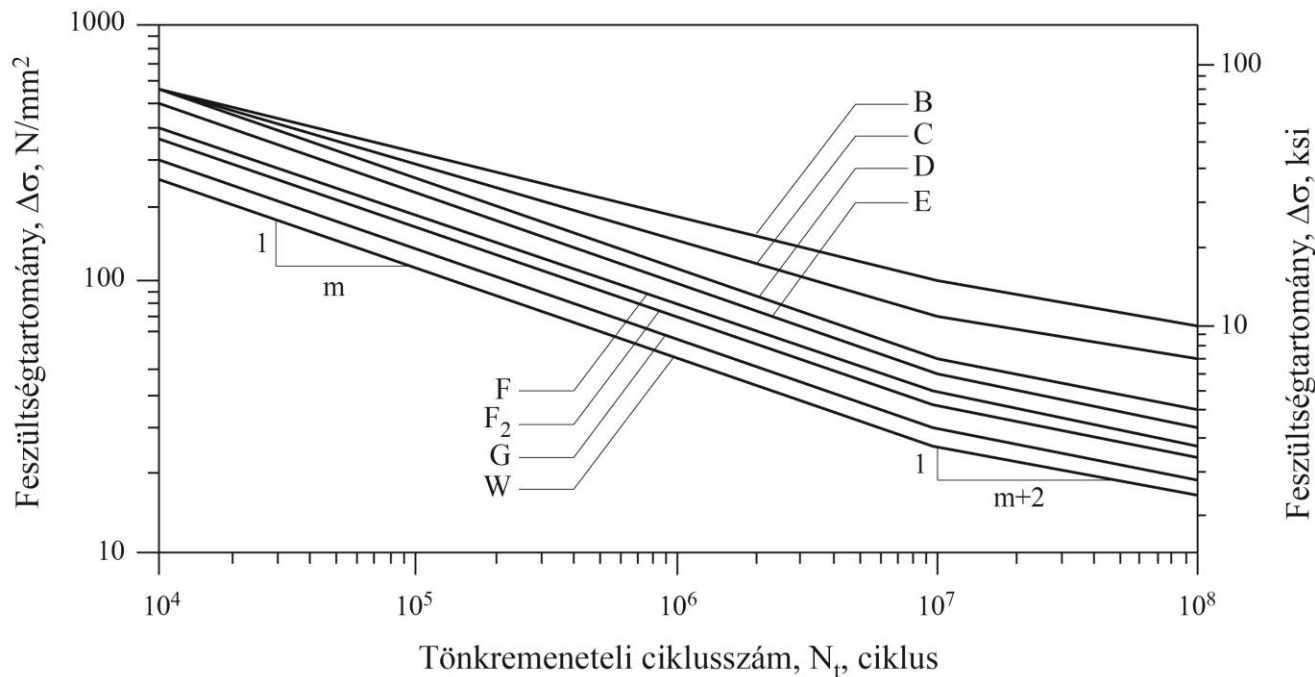
Alapanyag	Réteg	T_{pre}, T_{ip} (°C)	I (A)	U (V)	v_{heg} (cm/min)	E_v (J/mm)	$t_{8/5}$ (s)
S690QL	gyök: 1-2	150	130-140	19.0-20.5	20	700-750	7-8
	töltő: 3-18	180	280-300	28.5-28.5	40	1000-1100	9-11
S960QL	gyök: 1 / 2	200 / 180	96 / 194	17.3 / 22.0	11 / 27	727 / 764	6.7 / 6.5
	töltő: 3-12	150	298-308	29.0-31.0	45	940-1000	7-8
S960M	gyök: 1-2	60	130-140	19.0-20.5	20	700-750	7-8
	töltő: 3-8	150	270-300	27.0-28.0	30-45	900-1400	7-15
S1100M	gyök: 1 / 2	100 / 130	180 / 190	19.1 / 19.7	24 / 27	688 / 666	5
	töltő: 3-4 / 5-8	100 / 130	260 / 280	25.1 / 28.7	50 / 61	624 / 632	5
S1300Q	gyök: 1-2	100 / 130	180	19.1	31	562	5
	töltő: 3-4	100 / 130	240	22.7	53	493	5

- ✓ **Bevezetés**
- ✓ **A vizsgált hegesztett kötések**
 - Alapanyagok és hozaganyagok
 - Alapanyag – hozaganyag párosítások
 - Hegesztéstechnológia
- ✓ **Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF)**
- ✓ **Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok (FCG)**
- ✓ **Következtetések**



A nagyciklusú fáradás leírása

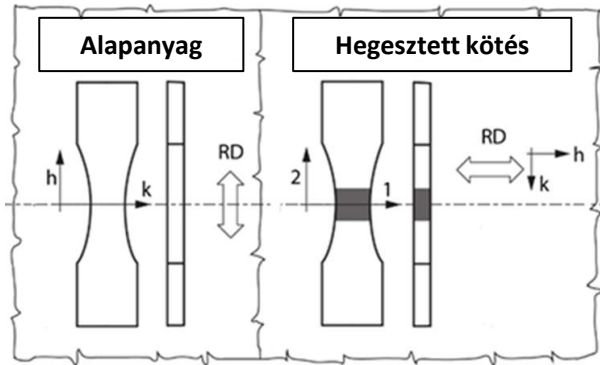
Tervezési görbék acélokra és hegesztett kötéseikre (BS 7608)



A HCF vizsgálatok sajátosságai

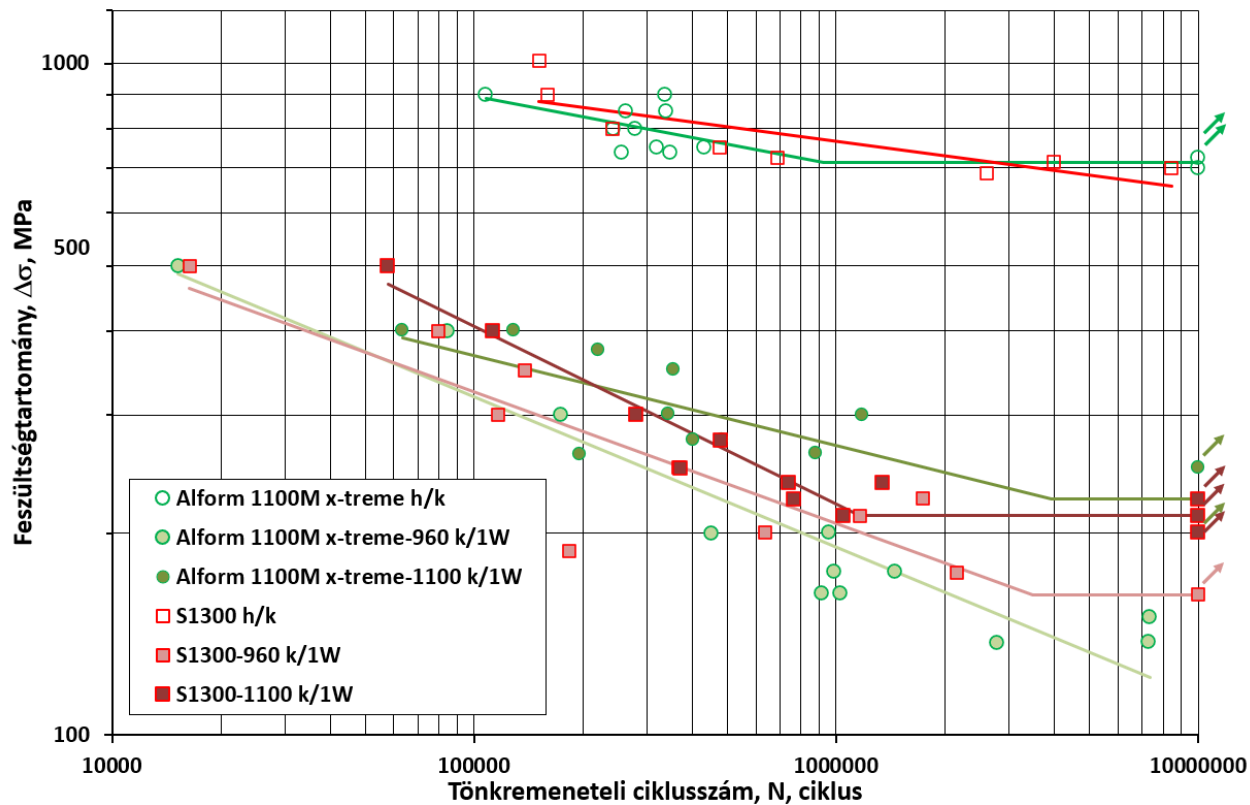


- ✓ **MTS elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszerek**
- ✓ **Próbatestek**
 - lapos próbatest
 - azonos próbatest geometria az alapanyagok (BM), a hegesztett kötésekből kimunkált (WJ) és a hegesztett kötéseket tartalmazó (BWJ) próbatestek esetén
 - „as-welded” állapot
- ✓ **Vizsgálati körülmények**
 - állandó értékű terhelés aszimmetria tényező $R = 0.1$
 - szinusz alakú terhelési függvény
 - $f = 15\text{-}25$ Hz terhelési frekvencia, a jellemző érték $f = 25$ Hz
 - szobahőmérséklet
 - laboratóriumi közeg

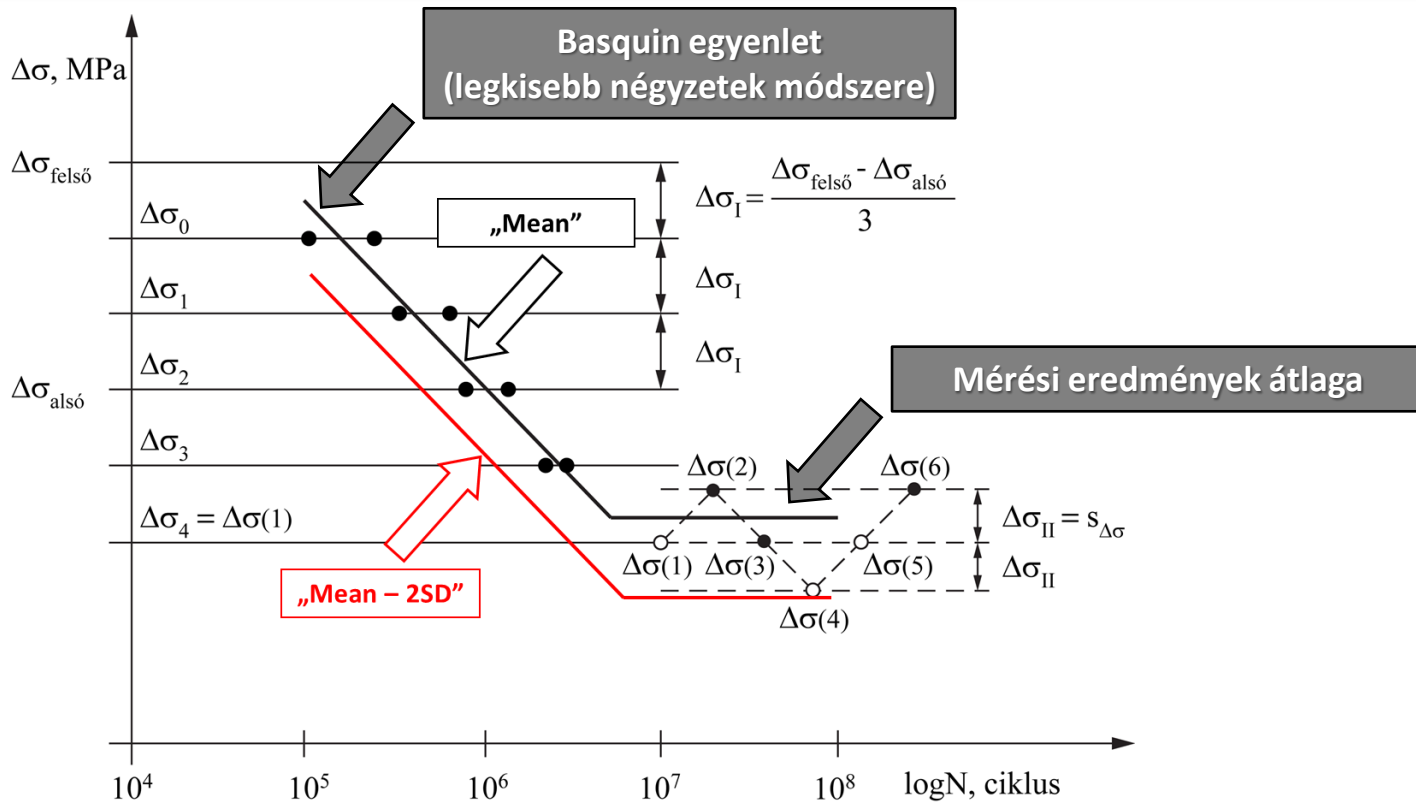




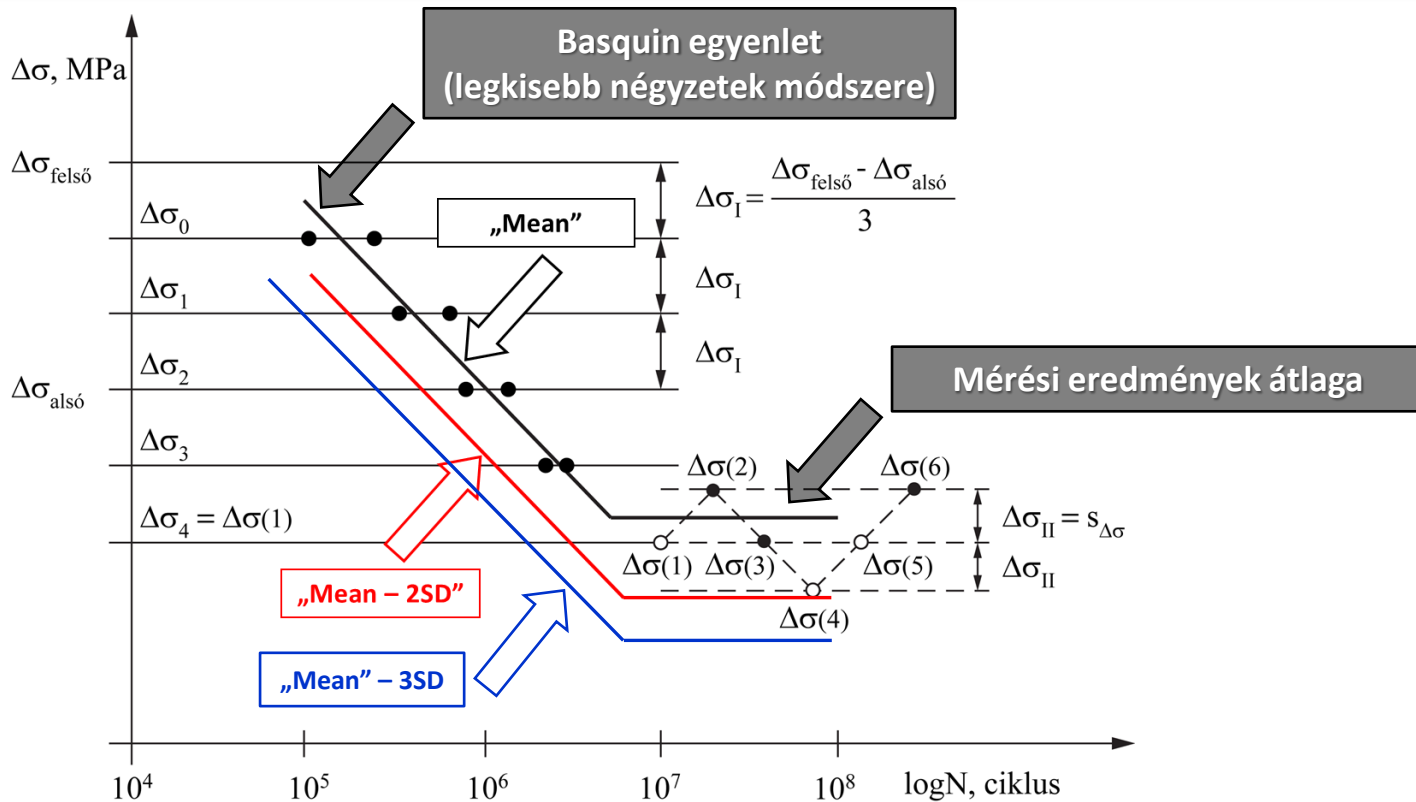
A HCF vizsgálatok eredményei



A nagyciklusú fáradás leírása

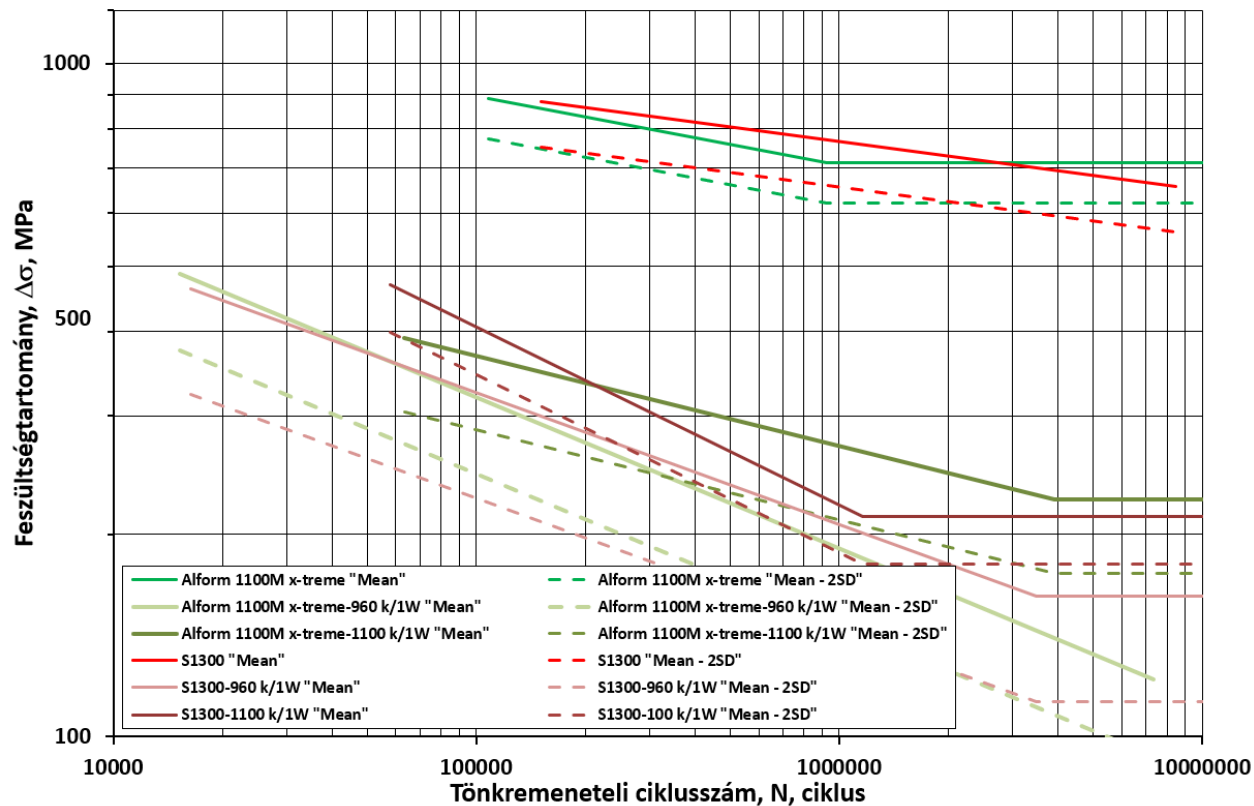


A nagyciklusú fáradás leírása





A HCF vizsgálatok eredményei: tervezési görbék



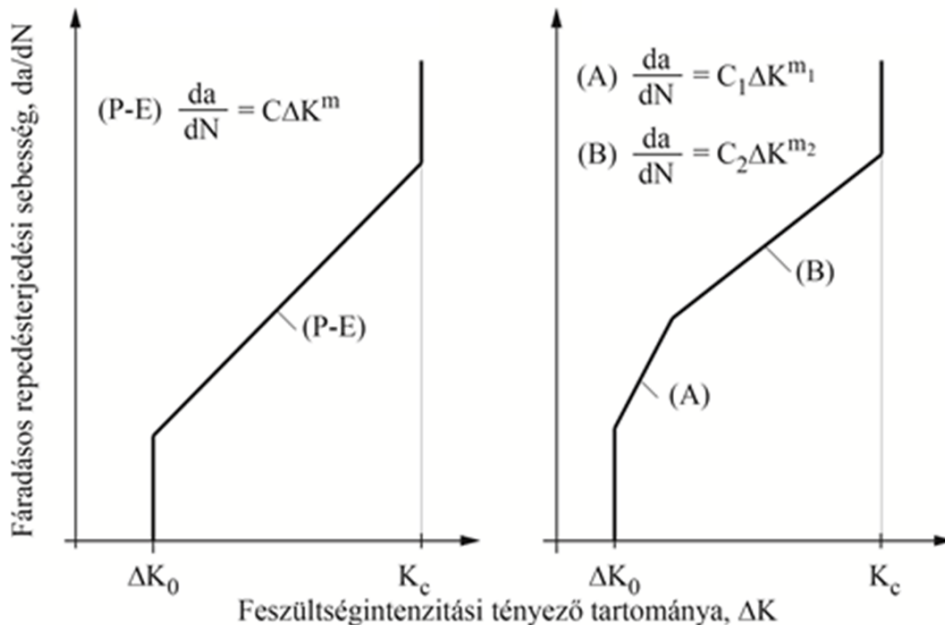
- ✓ **Bevezetés**
- ✓ **A vizsgált hegesztett kötések**
 - Alapanyagok és hozaganyagok
 - Alapanyag – hozaganyag párosítások
 - Hegesztéstechnológia
- ✓ **Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF)**
- ✓ **Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok (FCG)**
- ✓ **Következtetések**



A fáradásos repedésterjedés leírása

A tervezési görbék (BS 7910) elvi alakjai

**Egyszerű (Paris-Erdogan)
összefüggésre
épülő kapcsolat**



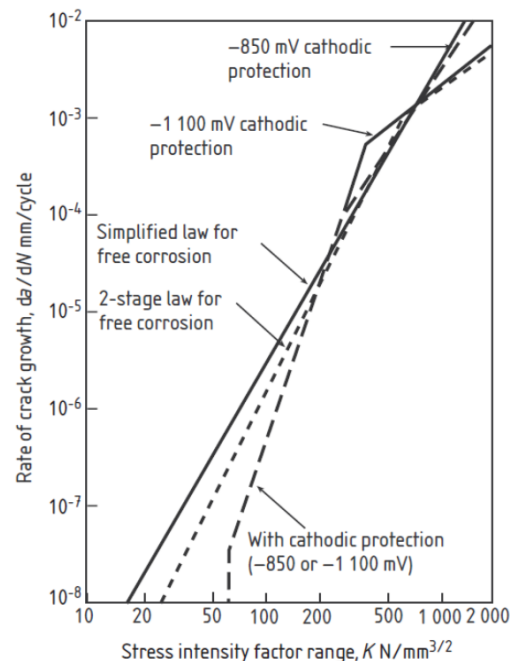
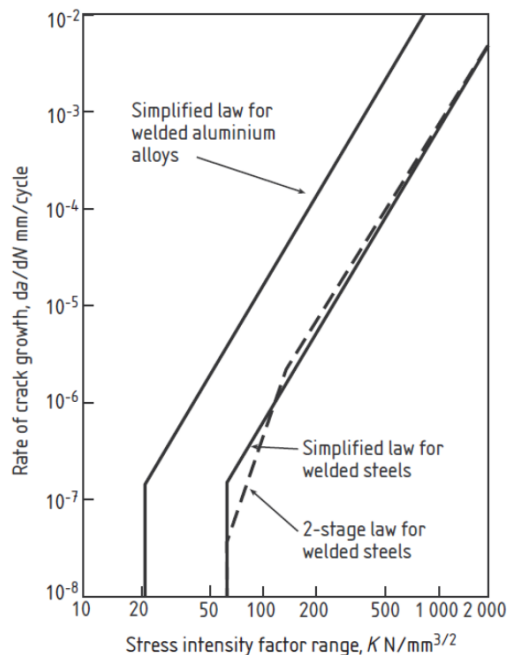
**Két szakaszra
osztott
kapcsolat**



A fáradásos repedésterjedés leírása

Tervezési görbék acélokra és alumíniumötvözetekre (BS 7910)

**Egyszerű (Paris-Erdogan)
összefüggésre épülő
és két szakaszra
osztott kapcsolatok:
hegesztett kötések**



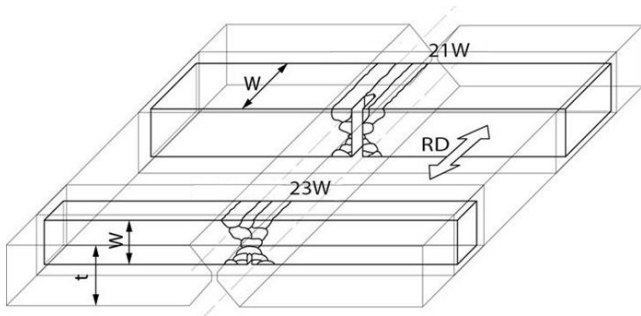
**Egyszerű (Paris-Erdogan)
összefüggésre épülő
és két szakaszra
osztott kapcsolatok:
korróziós és
katódvédelmi esetek**



A FCG vizsgálatok sajátosságai

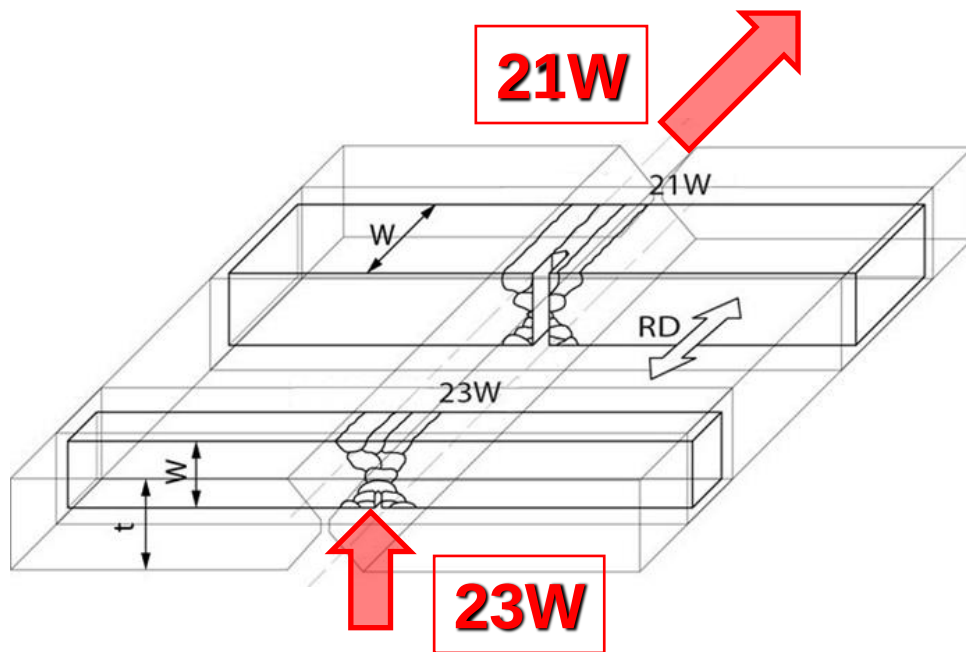
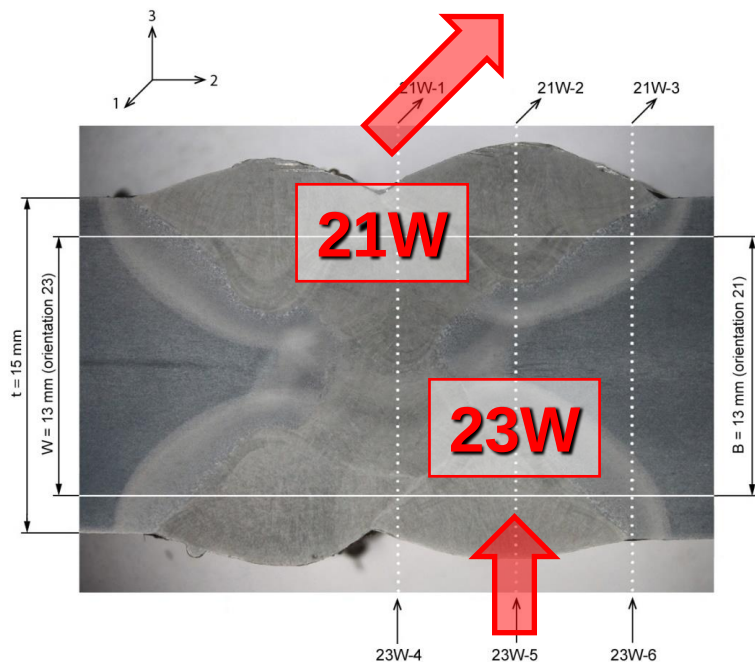


- ✓ **ASTM E 647 előírás**
- ✓ **MTS elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszer**
- ✓ **Próbatestek**
 - TPB próbatestek (W = lemezvastagságtól függő legnagyobb)
 - azonos próbatest geometria az alapanyagok (BM) és a hegesztett kötések (WJ) esetén
 - „as-welded” állapot
- ✓ **Vizsgálati körülmények**
 - $R = 0.1$ -es terhelés aszimmetria tényező
 - szinusz alakú terhelési függvény
 - $f = 20/5$ Hz-es terhelési frekvencia
 - szobahőmérséklet
 - laboratóriumi közeg



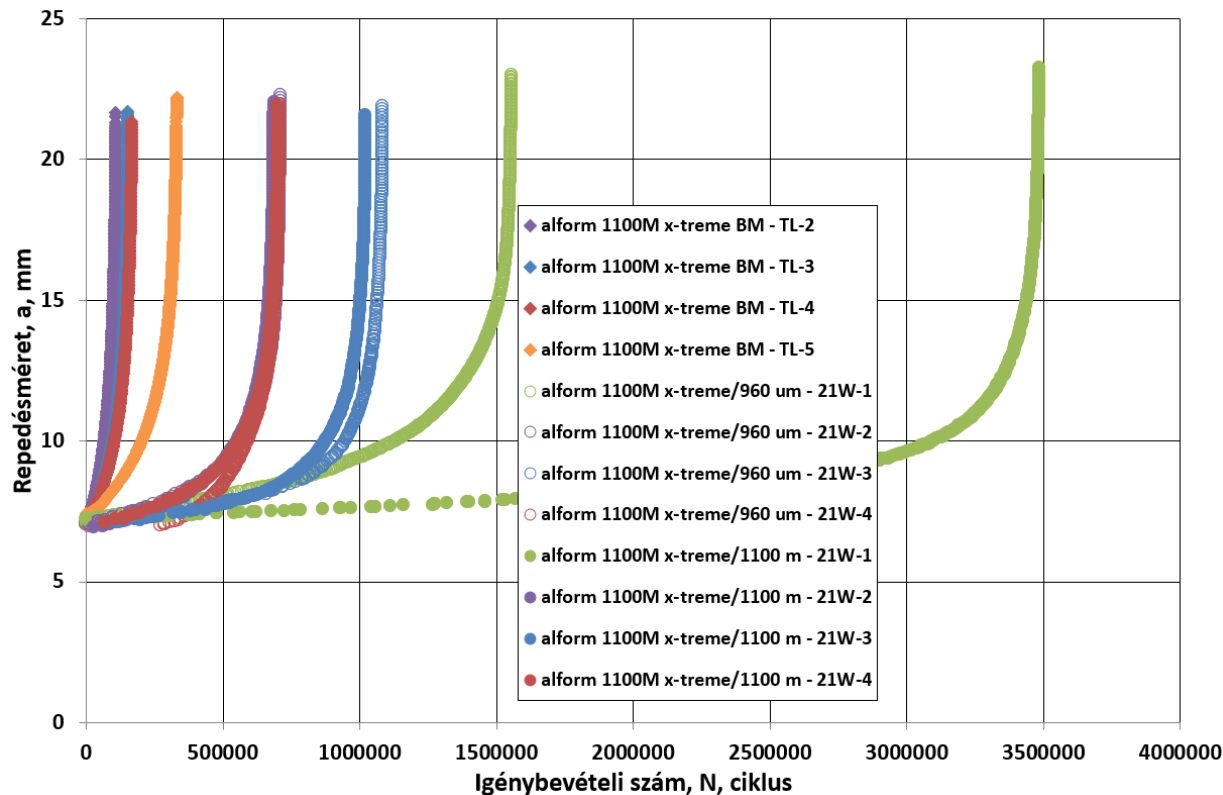
A FCG vizsgálatok sajátosságai

A bemetszések elhelyezkedése (a repedésterjedés iránya) hegesztett kötésekből kimunkált próbatestekben



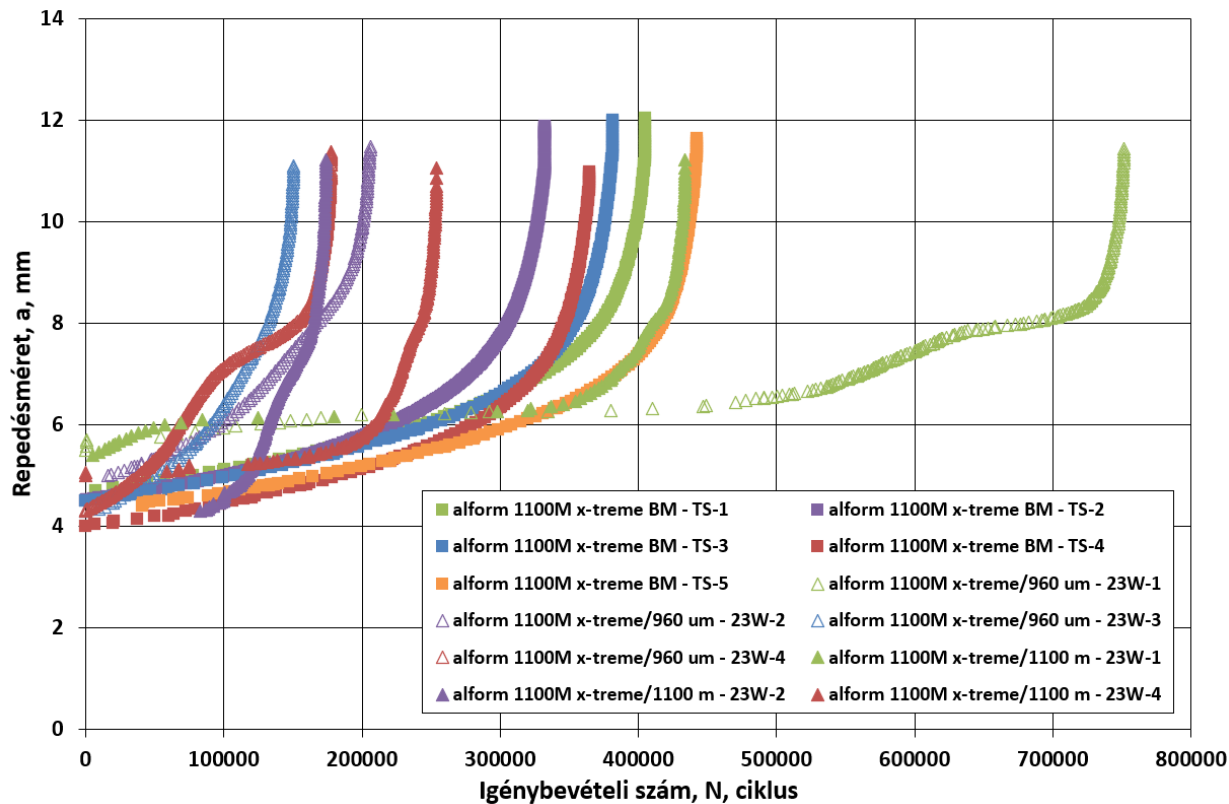


A FCG vizsgálatok eredményei: S1100M, T-L és 21



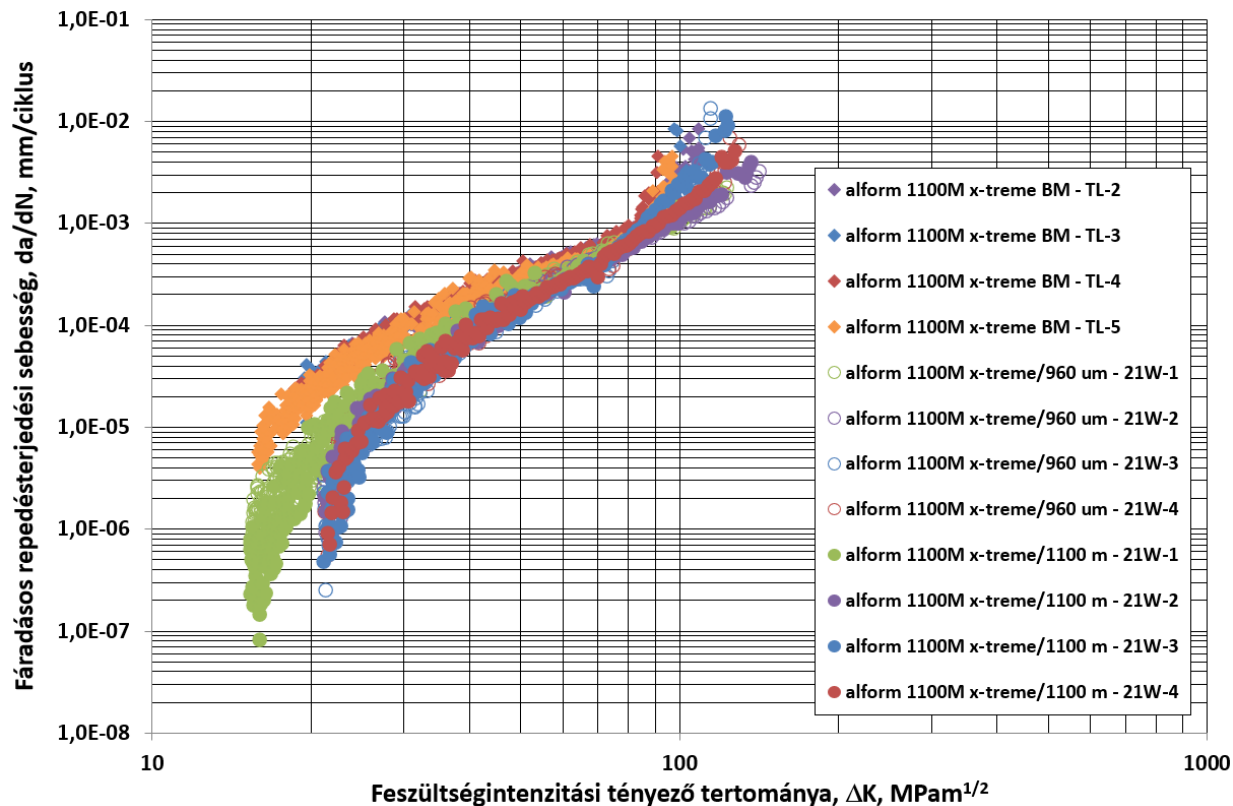


A FCG vizsgálatok eredményei: S1100M, T-S és 23



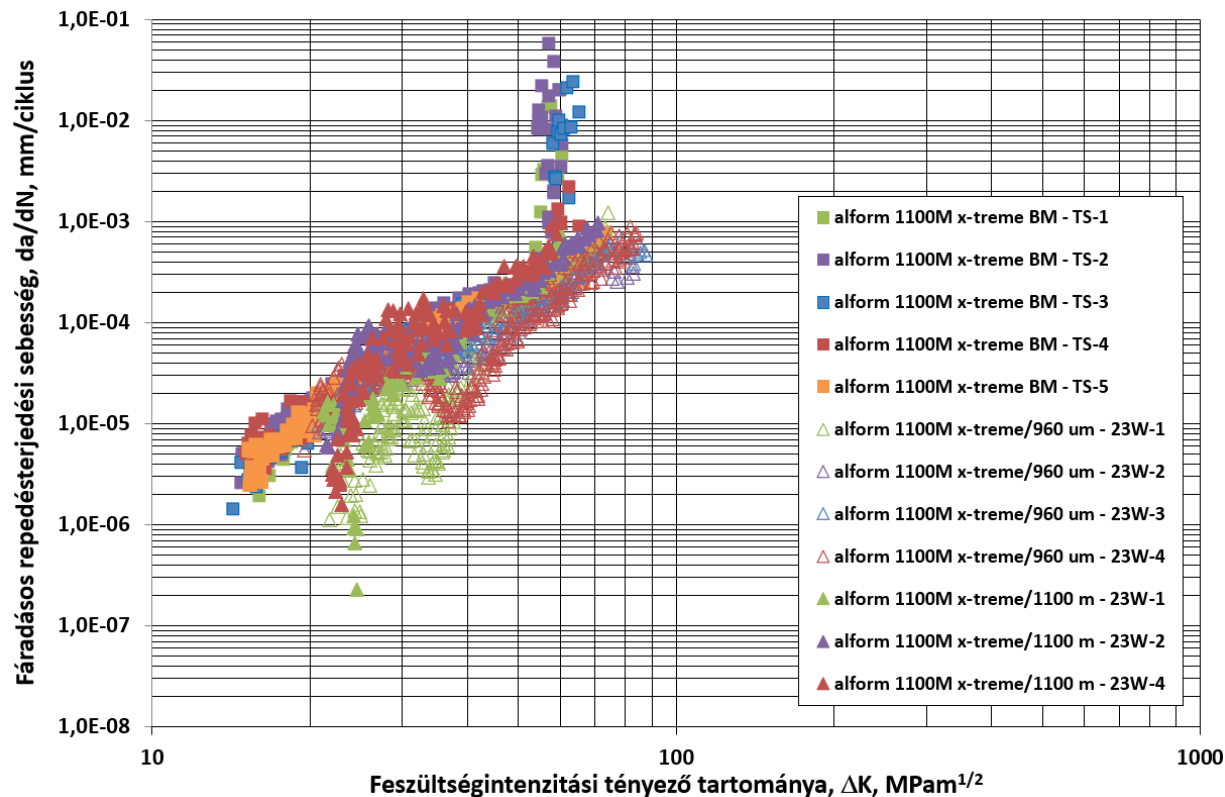


A FCG vizsgálatok eredményei: S1100M, T-L és 21



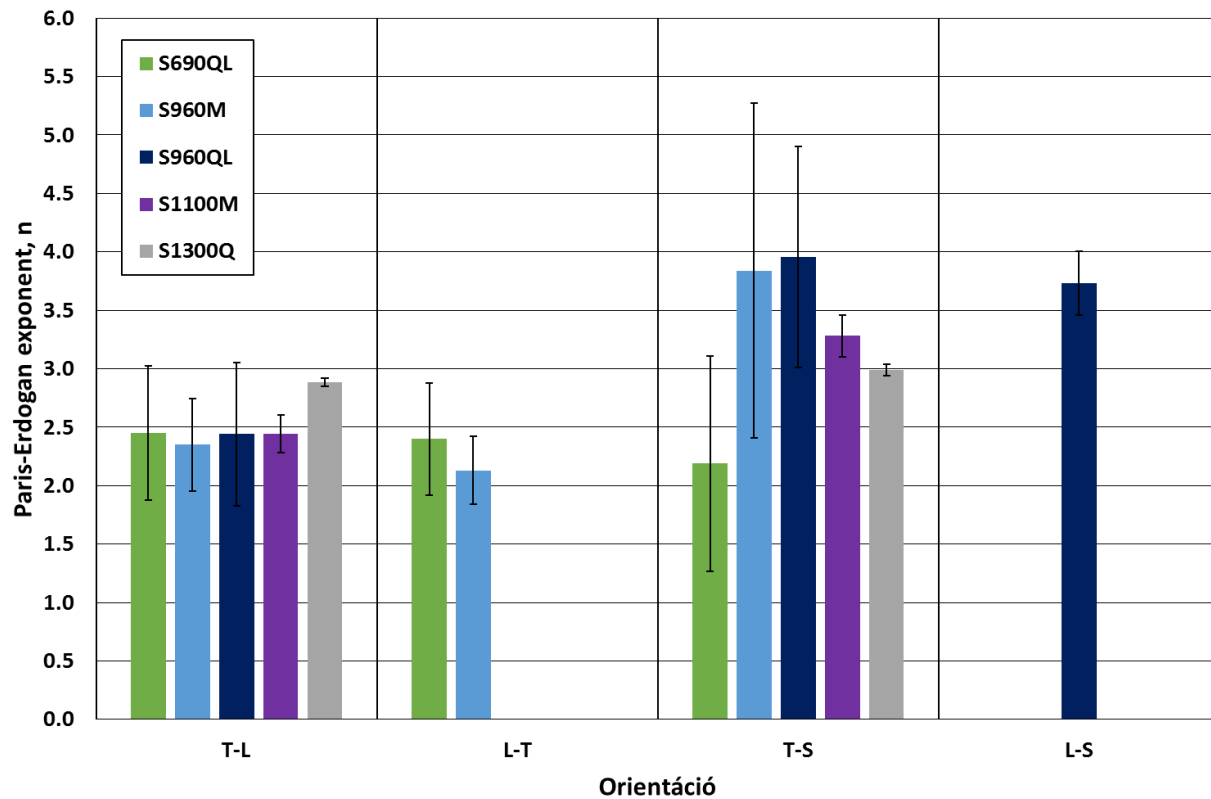


A FCG vizsgálatok eredményei: S1100M, T-S és 23



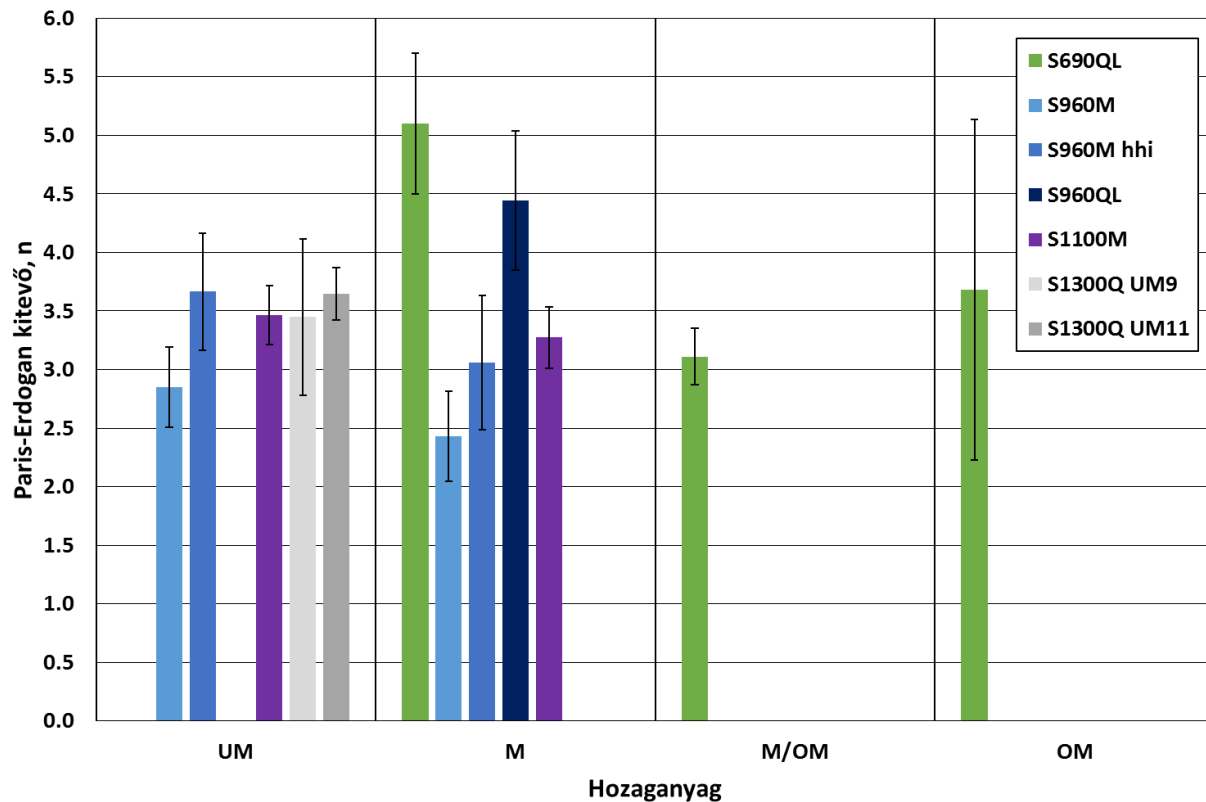


A FCG vizsgálatok eredményei: „n” értékek



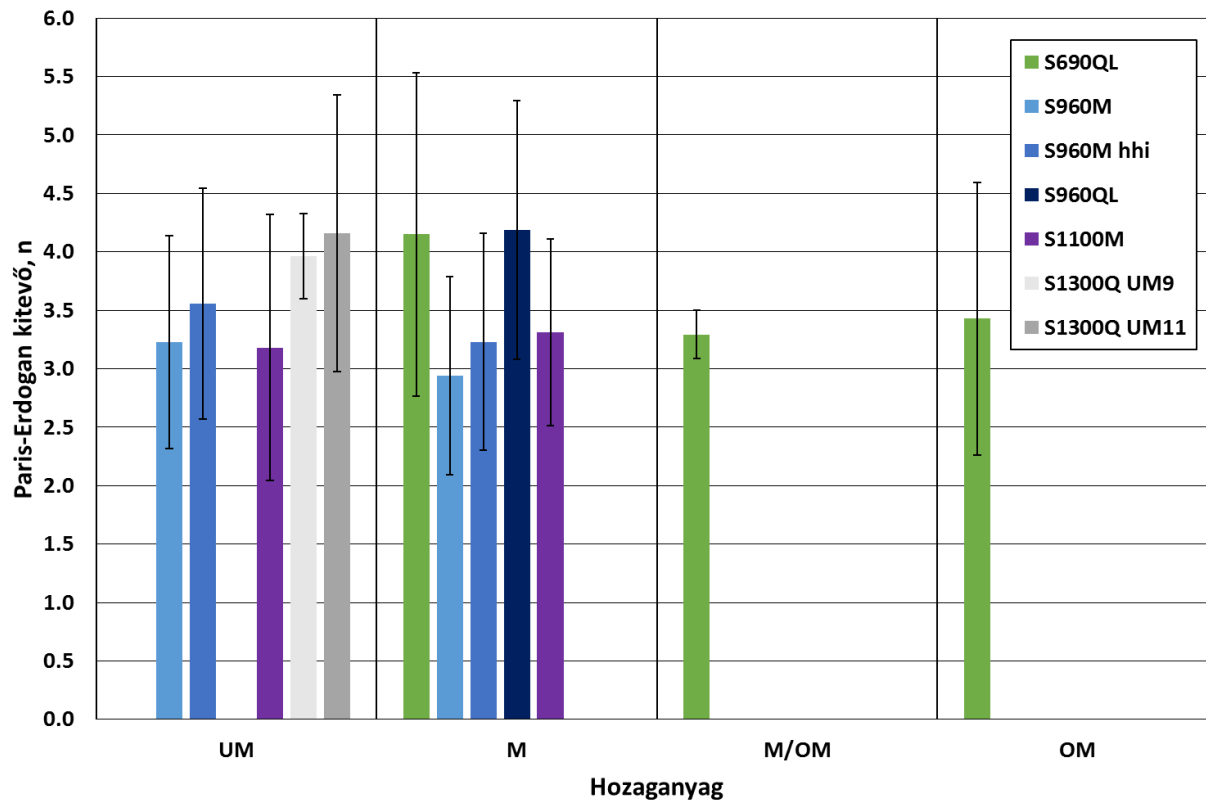


A FCG vizsgálatok eredményei: „n” értékek

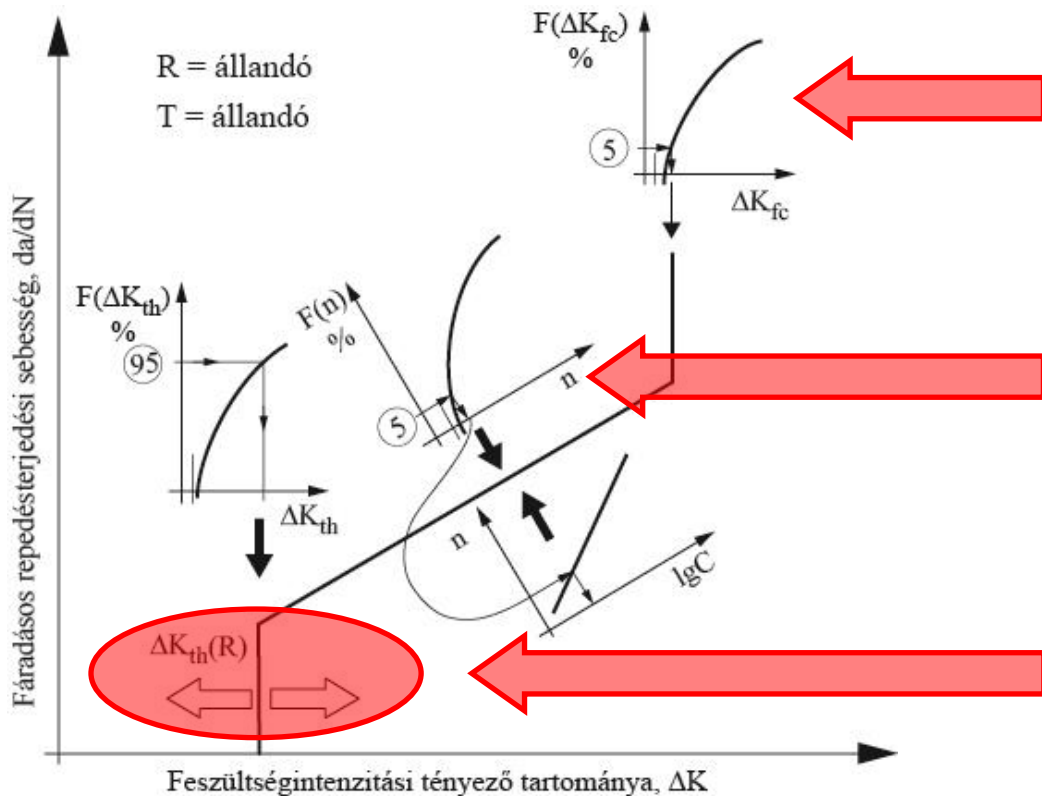




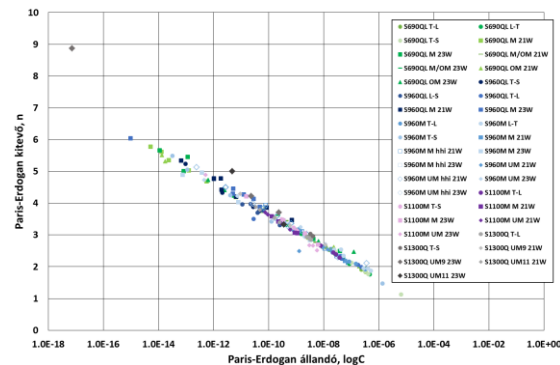
A FCG vizsgálatok eredményei: „n” értékek



A fáradásos repedésterjedés leírása



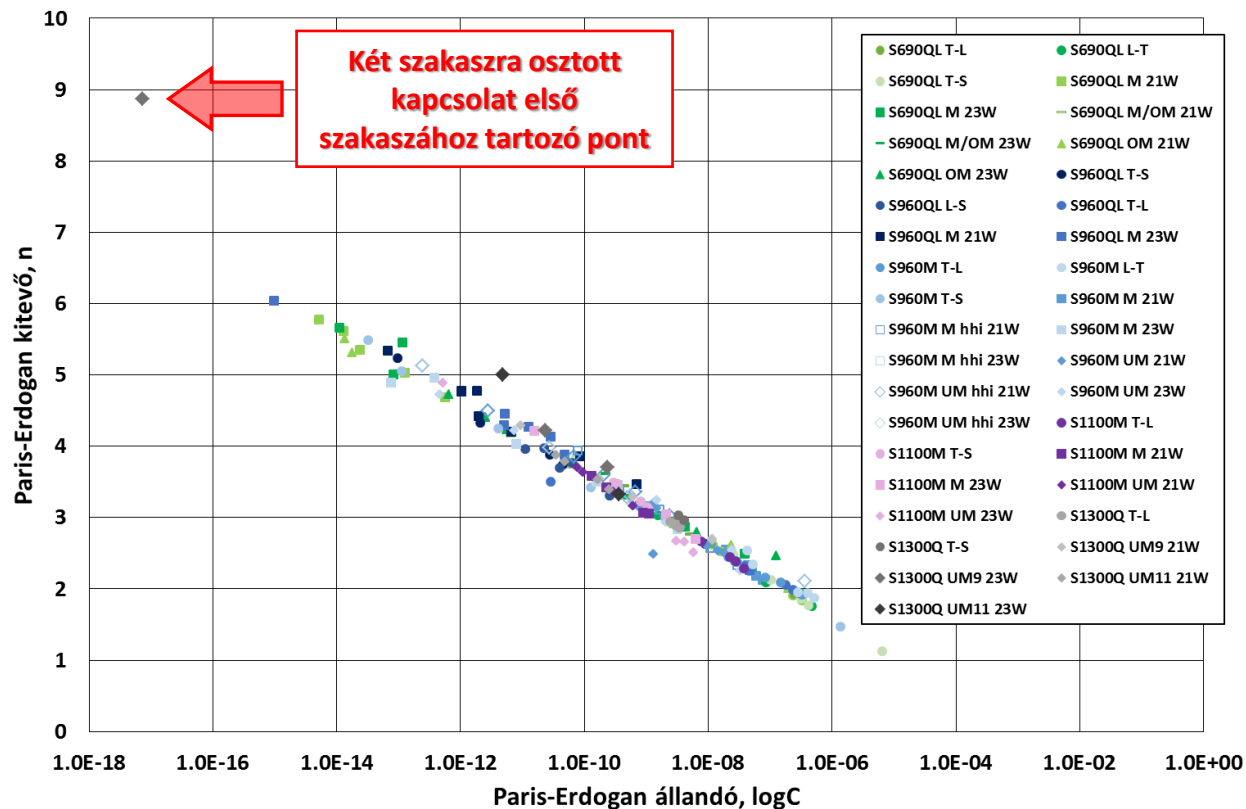
$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - N_0}{\beta} \right)^{1/\alpha} \right]$$



ΔK_{th} értékét csökkenteni kell
 húzó maradó feszültség és
 növelni lehet nyomó maradó
 feszültség esetén



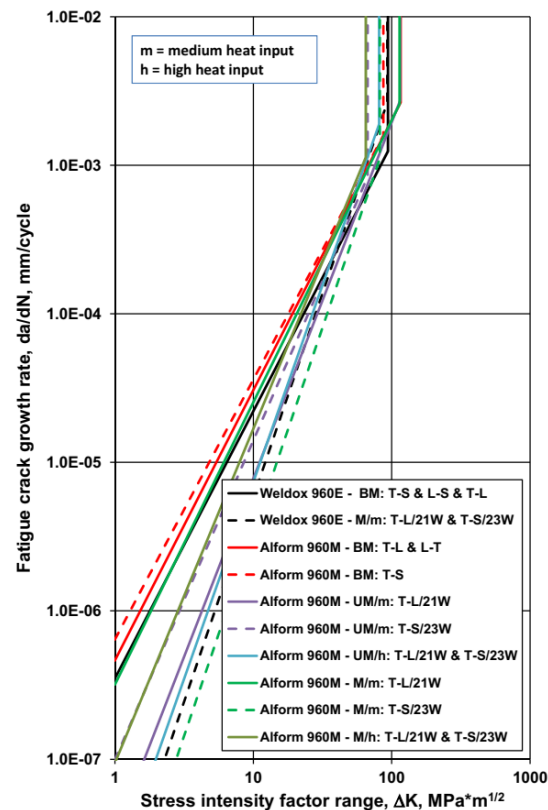
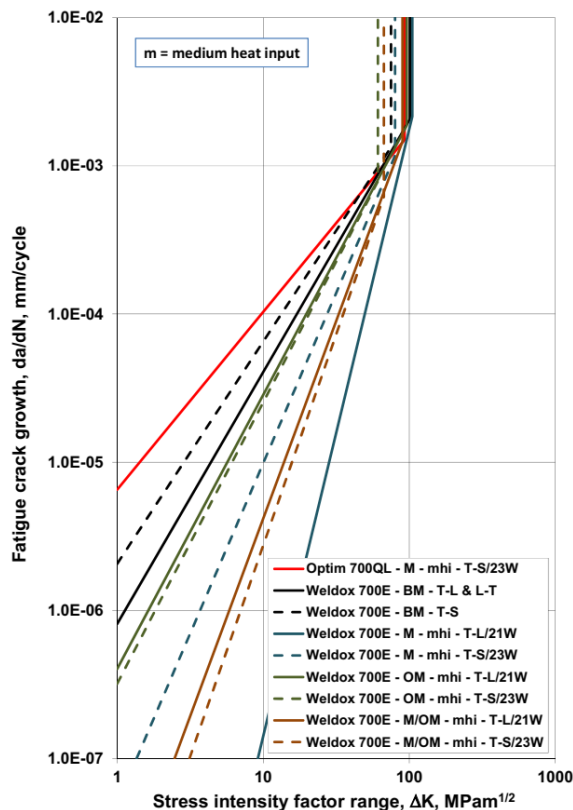
A Paris-Erdogan összefüggés két állandójának kapcsolata





A FCG vizsgálatok eredményei: tervezési görbék

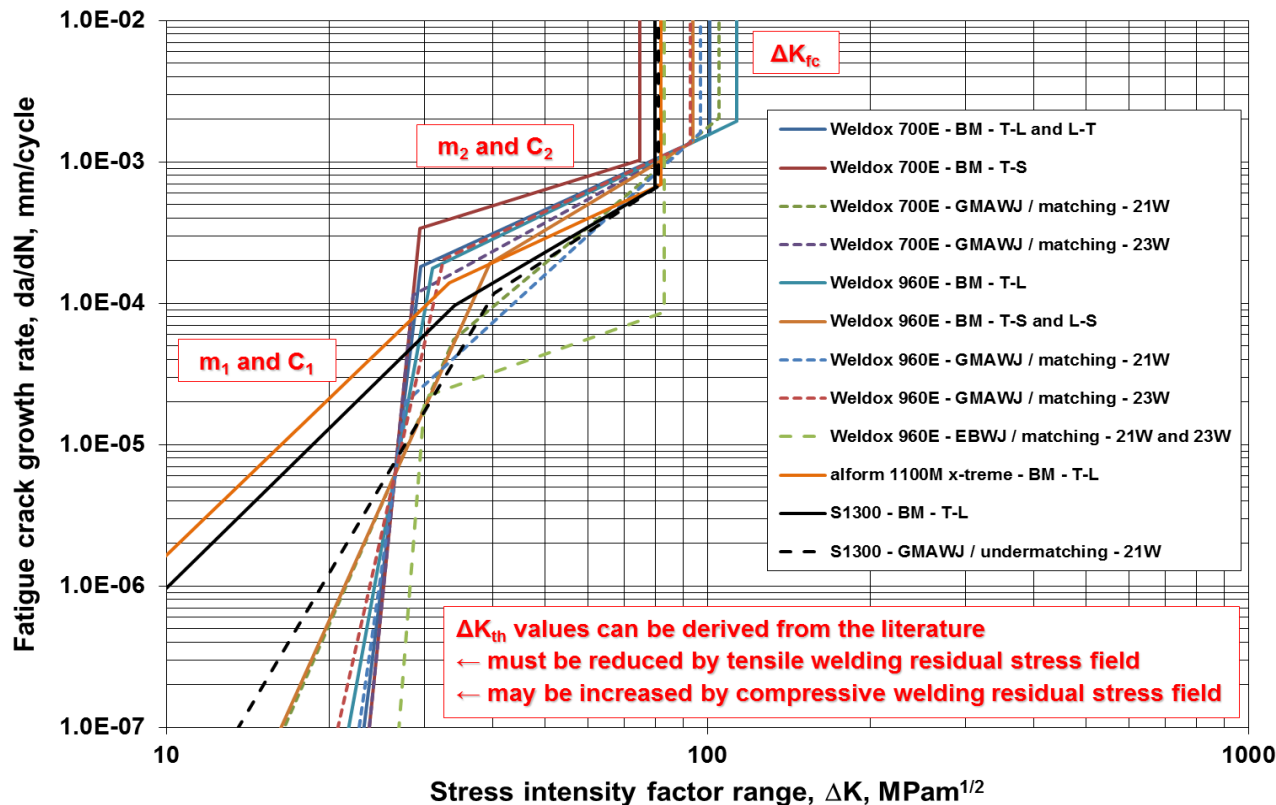
**Egyszerű (Paris-Erdogan)
összefüggésre
épülő kapcsolat**





A FCG vizsgálatok eredményei: tervezési görbék

Két szakaszra
osztott
kapcsolat



- ✓ **Bevezetés**
- ✓ **A vizsgált hegesztett kötések**
 - Alapanyagok és hozaganyagok
 - Alapanyag – hozaganyag párosítások
 - Hegesztéstechnológia
- ✓ **Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF)**
- ✓ **Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok (FCG)**
- ✓ **Következtetések**



Következtetések

- ✓ A nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett szerkezetek / hegesztett kötések ismétlődő igénybevételekkel (HCF és FCG) szembeni ellenállásának vizsgálata tervezési és technológiai kérdéseket egyaránt felvet
- ✓ Statisztikai szemlélet alkalmazása szükséges a megbízható eredmények és következtetések érdekében
 - a próbatestek száma
 - a repedések elhelyezkedése
 - az eredmények feldolgozása és értékelése
 - a tervezési határgörbék meghatározása
- ✓ A rendelkezésre álló hozaganyag választék szükségessé teszi a „mismatch” jelenség / hatás vizsgálatát, mind technológiai, mind tervezési oldalról

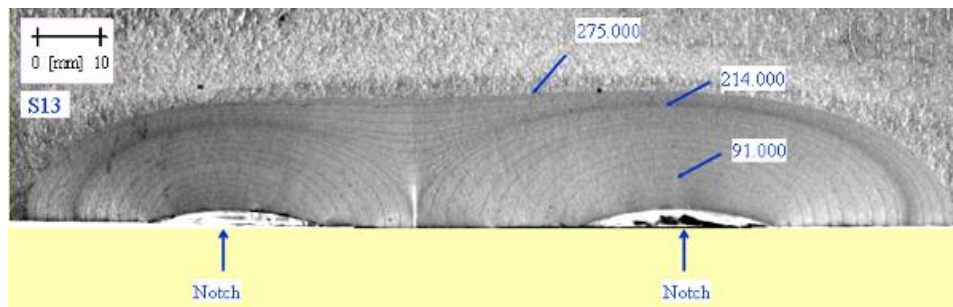


Következtetések

- ✓ **A nagyszilárdságú acélok és hegesztett kötések ismétlődő igénybevételekkel (HCF és FCG) szembeni ellenállását szignifikánsan befolyásolja**
 - **a technológiai paraméterek megválasztása**
 - **a „mismatch” jelenség / hatás**
 - **a repedés terjedésének iránya**
- ✓ **A hegesztett kötések különböző zónáiban elhelyezett bemetszések és az azokból induló repedések statisztikailag jellemzik magukat a hegesztett kötéseket és azok ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállását**
- ✓ **A hegesztett kötések ismétlődő igénybevételekkel (HCF és FCG) szembeni ellenállása nagyobb bizonytalansággal határozható meg, mint az alapanyagoké**

Következtetések

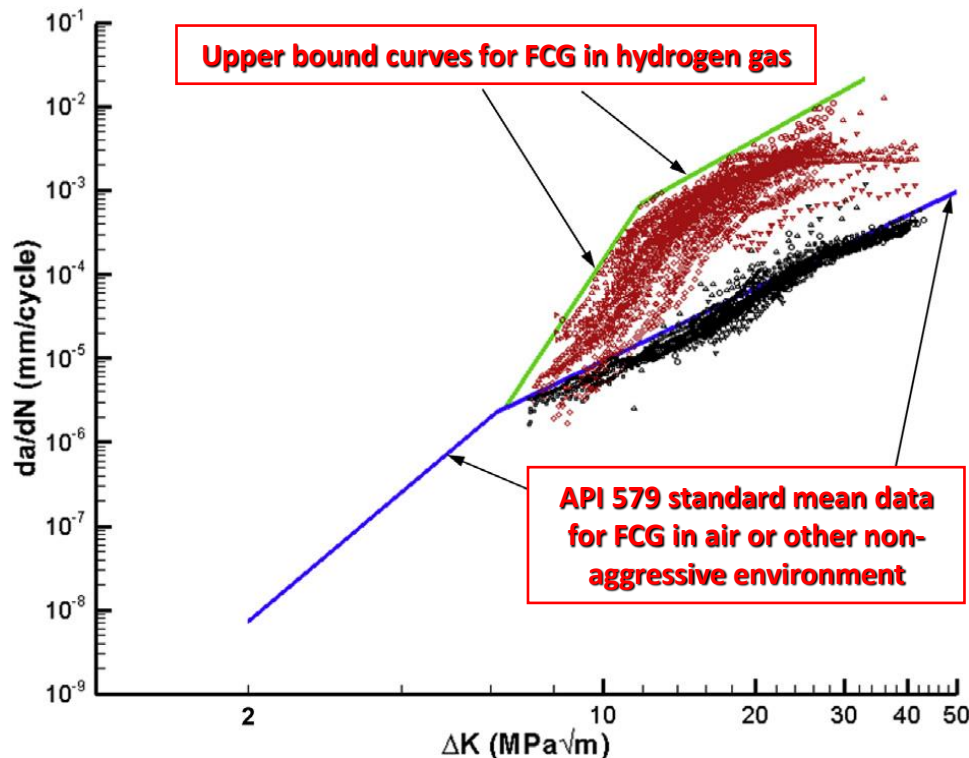
- ✓ A vizsgált acélok és hegesztett kötéseik érzékenyebbek a vastagság irányban terjedő repedésekre, mint a hengerlési irányban vagy az arra merőlegesen terjedő repedésekre



- ✓ Minél általánosabb érvényű tervezési görbéket határozzunk meg, annál nagyobb lesz az azokba beépülő tartalék – érdemes az általános és a konkrét kompromisszumát megkeresni és megtalálni

Következtetések

- ✓ A fáradásos repedésterjedésre vonatkozó tervezési görbék szerepe és a két (**több!**) szakaszra osztott kapcsolatok meghatározása felértékelődik → hidrogén tartalmú közegben üzemelő szerkezeti elemek





MISKOLC
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC



Nagyszilárdságú acélok és hegesztett kötéseik ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállása

Prof. Dr. János Lukács janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Dr. Pap Judit judit.kovacs@uni-miskolc.hu

Köszönjük a megtisztelő figyelmet!