

## NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ELEKTRONSUGARAS HEGESZTETT KÖTÉSEINEK FÁRADÁSOS REPEDÉSTERJEDÉSSEL SZEMBENI ELLENÁLLÁSA

**Sisodia, R.**

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [metraghu@uni-miskolc.hu](mailto:metraghu@uni-miskolc.hu)

**Gáspár, M.**

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [metraghu@uni-miskolc.hu](mailto:metraghu@uni-miskolc.hu)

### **Absztrakt**

A kutatómunka az S960QL nemesített és az S960M termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú szerkezeti acélok elektronsugaras hegesztett kötéseinek fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállására irányult. A hegesztési kísérletek során 15 mm vastag alapanyagokat alkalmaztunk hozaganyag nélküli (autogén), I-varratos, hegesztett kötések létrehozásához. A repedésterjedési vizsgálatokhoz alkalmazott hárompontos hajlító (TPB) próbatesteket úgy munkáltuk ki, hogy azok a jellemző irányokra merőlegesek, illetve párhuzamosak legyenek, valamint a bemetszések helyzetét a hegesztett kötések jellemző részeinek (varrat, beolvadási vonal, hőhatásövezet) elemzése céljából is változtattuk. Ennek megfelelően a vizsgálataink során terjedő repedések a valós szerkezetekben előforduló, különböző repedés megjelenési helyeknek felelnek meg. A vizsgált S960M acél elektronsugaras hegesztett kötésének fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása a vizsgált irányokban szignifikánsan különbözőnek bizonyult, az S960QL acél esetében ilyen különbség nem mutatkozott. A vizsgált S960QL acél elektronsugaras hegesztett kötése, mindkét vizsgált irányban lényegesen érzékenyebbeknek bizonyultak a fáradással terjedő repedések elhelyezkedésére, mint a vizsgált S960M acél kötése.

**Kulcsszavak:** nagyszilárdságú acél, elektronsugaras hegesztés, nemesített, termomechanikusan kezelt, fáradásos repedésterjedés

### **Abstract**

The research focused on the fatigue crack growth resistance of electron beam welded joints of quenched and tempered S960QL and thermomechanically rolled S960M high strength structural steels. In the welding experiments, 15 mm thick base materials were used to prepare the autogenous welded joints with I weld geometry. The three-point bending (TPB) specimens used for the fatigue crack growth tests were designed to be perpendicular or parallel to the characteristic directions, and the notch positions were also changed for the analysis of the characteristic parts of the welded joints (weld, fusion line, heat-affected zone). The cracks propagating during our tests correspond to the different crack appearances in the real welded structures. The fatigue crack growth resistance of the electron beam welded joint of the examined S960M steel proved to be significantly different in the examined directions, the S960QL steel did not show such a difference. The electron beam welded joints of S960QL steel proved to be significantly more sensitive to the location of fatigue cracking cracks in both directions than the joints of the examined S960M steel.

**Keywords:** high strength steel, electron beam welding, quenched and tempered, thermomechanically rolled, fatigue crack growth

## 1. Bevezetés

A járműiparban egyre nagyobb igény mutatkozik a nagyszilárdságú szerkezeti acélok alkalmazására, amelyekkel jelentős sajáttömeg csökkenést lehet elérni a mérnöki szerkezetekben. Ezeket a szerkezeti acélokat rendszerint nemesítéssel vagy termomechanikus kezeléssel állítják elő, amely hőkezelési és hengerlési technológiáknak köszönhetően a nagyszilárdságú acélok a kimagasló szilárdsági jellemzők mellett jelentős szívóssággal is rendelkeznek. Hegesztett szerkezetek esetén ezen acéloknak az alkalmazása azonban számos kihívást tartogat a felhasználók számára. A nagyszilárdságú acélok rendkívül érzékenyek a hegesztési hőbevitelre, amelynek hatására a mechanikai tulajdonságok romlása következik be a hőhatásövezetben [1]. További nehézséget jelent, hogy a nagyobb szilárdsági kategóriák esetén korlátozott hozaganyag választék áll rendelkezésre, 1100 MPa folyáshatár felett pedig nincsenek is az alapanyaggal azonos szilárdsági jellemzőket biztosító, ún. matching típusú hozaganyagok. Az ipari gyakorlatban az ömlesztő hegesztő eljárások közül alapvetően a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést alkalmazzák a leggyakrabban. Ez a technológia egyrészt viszonylag nagy hőbevitellel jár, másrészt pedig csak hozaganyagossal változtatban érhető el, ebből következően igény van a kis hőbevitelt eredményező, ugyanakkor termelékeny hegesztő eljárások alkalmazására. A nagy hőáramsűrűségű hegesztő eljárások (elektronsugaras és lézersugaras hegesztés) egyedülálló lehetőséget biztosítanak ezen acélok hegesztésére, mivel a kulcslyuk technológiának köszönhetően keskeny hőhatásövezettel rendelkező mély varratok állíthatók elő. Ebből adódóan a mechanikai tulajdonságok romlása egy szűkebb anyagterefogatra koncentrálódik, mint ívhegesztések esetén [2].

A nagyszilárdságú acélok széleskörű felhasználását az is nehezíti, hogy a nagy szilárdságból származó előnyök elsősorban a szerkezetek statikus terhelése esetén használhatók ki. Ugyanakkor a nagyszilárdságú acélból készülő, sok esetben mozgó hegesztett szerkezetek vagy szerkezeti elemek gyakran ismétlődő igénybevételnek vannak kitéve. Statisztikai adatok azt mutatják, hogy a tönkremenetelek harmada a hegesztett kötésekben jelentkezik, míg négyötödük ismétlődő igénybevételű szerkezetekben következik be. Továbbá, az esetleges kötészabályok, anyagfolytonossági hibák kiemelt kockázatot jelentenek az ismétlődő igénybevételű terhelések esetében [3]. Hegesztett szerkezetek esetén kérdésként fogalmazódik meg a felhasználók számára, hogy a hegesztett kötések fáradással szembeni ellenállása milyen viszonyban van az alapanyag(ok) fáradási tulajdonságaival, továbbá sok esetben az alkalmazott hegesztéstechnológia szerepe is kritikusnak bizonyul a hegesztett kötés ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásában. Számos kutatás foglalkozik a hozaganyag-alapanyag szilárdsági és alakváltozási viszonyának (matching kérdéskör), valamint a hegesztési hőbevitelnek fáradási tulajdonságokra gyakorolt hatásával [1, 4, 5].

A kísérleteinkhez hozaganyag nélküli (autogén) elektronsugaras hegesztést alkalmaztunk az S960QL nemesített és az S960M termomechanikusan kezelt szerkezeti acélok hegesztett kötéseinek elkészítéséhez. A hegesztett kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállását, a nagyszilárdságú acélokra jellemző fokozott repedési veszélyre való tekintettel, fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok elvégzésével elemeztük, amelyek során statisztikai szemlélet követtünk mind a kísérletek tervezése, mind azok eredményeinek kiértékelése során. Ez lehetővé tette a kapott eredmények érvényességének tartományának kiszélesítését és az adatok megbízhatóságának növelését.

## 2. A nagyszilárdságú acélok hegeszthetősége

A nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztésekor a viszonylag nagy karbonegyénérték miatt a Graville diagram alapján fokozott hidegrepedési hajlammal kell számolni mind a varrat, mind pedig a hőhatásövezet esetén. Ebből adódóan hegesztésükhöz előmelegítés javasolt, valamint töreked-

ni kell a varratban lévő diffúzióképesség hidrogéntartalom csökkentésére. A repedési veszély mellett problémaként jelentkezik a varratban és a hőhatásövezetben bekövetkező szívósságcsökkenés, amelynek oka részben a hegesztés során kialakuló martenzites, illetve a hűlési idő függvényében felsőbénítés szövetszerkezetre, a hőhatásövezetben végbemenő szemcsedurvulásra és a martenzit-ausztenit (M-A) szigetek kialakulására vezethető vissza. Túlságosan nagy hegesztési hőbevitel esetén a hőhatásövezetben kilágyult részek is kialakulhatnak, amelyek csökkentik a hegesztett kötés teherviselő képességét [1].

Az előzőekben ismertetett okok miatt a hegesztéstechnológia tervezéséhez alkalmazott  $t_{8/5}$  hűlési idő a hidegrepedésképződési hajlam miatt alulról, a szívósság- és a szilárdságcsökkenés miatt pedig felülről is korlátos. Az S960QL acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése esetén általában 5-10 s szokott lenni ez az ajánlott hűlési időtartomány. Termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélok esetén a kisebb karbontartalom és karbonegyénérték miatt előmelegítést a vékony és a középvastag lemezek esetén nem szükséges alkalmazni, valamint a szívósságcsökkenés mértéke is kisebb. Ebből következően az ajánlott  $t_{8/5}$  hűlési időtartomány a nemesített nagyszilárdságú acélokhoz képest szélesebb (3-15 s) [1, 4].

Elektronsugaras hegesztés esetén a nagy hőáramsűrűség miatt a  $t_{8/5}$  hűlési idő értéke általában 5 s alatt van, amely kedvező a mechanikai tulajdonságok megőrzése szempontjából, a hidegrepedések elkerülésében pedig a védelemként alkalmazott nagy vákuum nyújt biztosítékot a varrat diffúzióképes hidrogéntartalmának csökkentésére.

### 3. Kísérletek

#### 3.1. Vizsgált anyagok

A vizsgálatainkhoz S960QL nemesített és S960M termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú szerkezeti acélokat alkalmaztunk, 15 mm-es lemezvastagsággal. Az alapanyagok, valamint a fűzéshez használt 1,2 mm átmérőjű, az MSZ EN ISO 16834-A szabvány szerinti G 89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo jelölésű, „matching típusú”, Union X96 huzalelektroda vegyi összetételét az 1. táblázat, mechanikai tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A vizsgált alapanyagok és a fűzéshez használt hozaganyag mechanikai jellemzői

Jelölés	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %	$KV_{-40\text{ °C}}$ , J
S960QL	1014	1053	14	75
S960M	1051	1058	17	177
X96	$\geq 930$	$\geq 980$	$\geq 14$	$\geq 40$

Megfigyelhető, hogy az S960M acél esetén a termomechanikus kezelésnek köszönhetően közelítőleg fele akkora karbontartalom esetén érik el ugyanazt a szilárdságot, mint az S960QL acélnál.

2. táblázat. A vizsgálat alapanyagok és hozaganyagok vegyi összetétele, tömeg%-ban

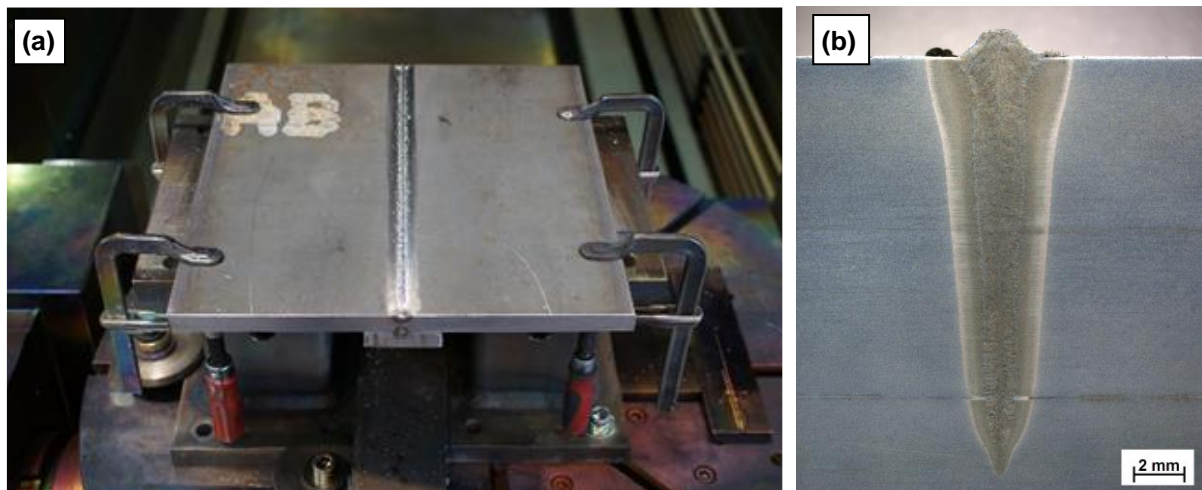
Jelölés	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Ti	V	Cu	Al
S960QL	0,17	0,23	1,23	0,20	0,588	0,04	0,001	0,011	0,00	0,04	0,01	0,06
S960M	0,09	0,32	1,63	0,59	0,29	0,03	0,001	0,011	0,02	-	-	0,04
X96	0,12	0,80	1,90	0,45	0,55	2,35	-	-	-	-	-	-

### 3.2. Kísérleti körülmények

A hegesztési kísérletek során  $300 \times 150 \times 15$  mm lemezek tompahegesztését végeztük el, a lemezek éleinek leélezése nélkül, I varratkialakítással. A kedvezőbb varratulajdonságok elérése érdekében ugyanebből az anyagminőségből alátétlemezt alkalmaztunk  $300 \times 50 \times 15$  mm méretben gyökmegtámasztás céljából. Előzetes hegesztési kísérletek alapján sikerült meghatározni a teljes átolvadást eredményező optimális elektronsugaras hegesztési paramétereket, amelyek a 3. táblázatban szerepelnek. A munkatávolság 500 mm volt. A hegesztést egy rétegben, előmelegítés nélkül végeztük el az 1. ábrán látható készülékben egy EBOCAM EK74C – EG150-30BJ típusú elektronsugaras berendezéssel teljes vákuum alkalmazása ( $2 \times 10^{-4}$  mbar) mellett. A hegesztést követően a munkadarabot néhány percn keresztül hagytuk lehűlni a vákuumkamrában az oxidáció elkerülése érdekében.

3. táblázat. Az alkalmazott hegesztési paraméterek

$U_{gy}$ , kV	$I_s$ , mA	$v_h$ , mm/s	$d_s$ , mm	$I_t$ , mA	$p$ , mbar
150	49	10	0,4	2067	$2 \times 10^{-4}$

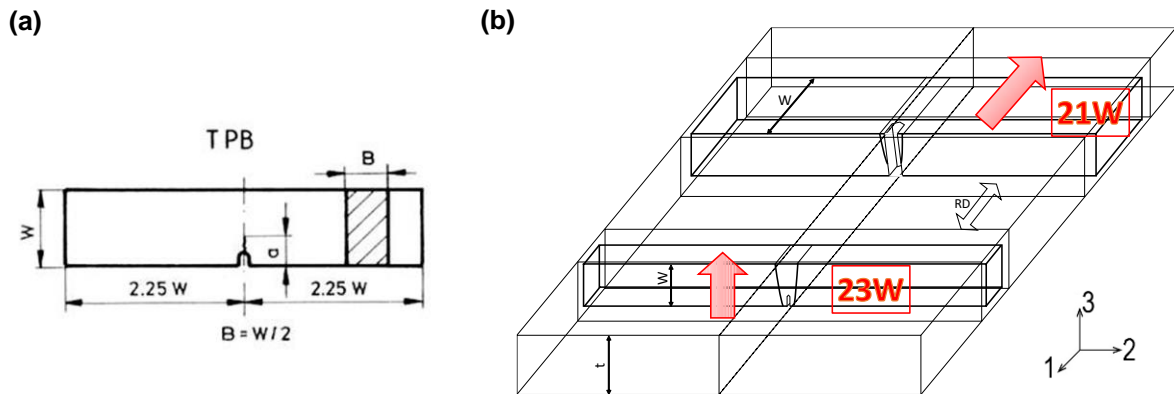


1. ábra. A készülékben elhelyezett hegesztett kötés (a) és annak makrosziszolata (b)

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz a hegesztett kötésekben hárompontos hajlító TPB (three point bend) próbatesteket munkáltunk ki, amelyek méreteit az 5. és a 6. táblázatok tartalmazzák. A próbatestek orientációjának jelölésében T: a legkisebb nyújtás iránya, L: a legnagyobb nyújtás iránya, S: a legnagyobb zömítés iránya; első karakter: a repedés síkjára merőleges irány, második karakter: a törés várható iránya (2. ábra (b) részlet). A próbatestek vázlatát és a bemetszések elhelyezkedését a 2. ábra szemlélteti. A hegesztett kötés irányainak jelöléseit használva 21 (21W) és 23 (23W) irányban munkáltuk ki a próbatesteket. Annak érdekében, hogy a bemetszések elhelyezkedése minél inkább reprezentálja a valós szerkezetekben előforduló legjelentősebb és legveszélyesebb repedéseket, a varrat középvonalához képest különböző távolságokra munkáltuk ki a bemetszéseket, mindkét irányon belül.

Az FCG vizsgálatok esetében húzó igénybevételt alkalmaztunk,  $R = 0,1$  terhelés aszimmetria tényezővel, szinusz alakú terhelésvéggyénnel, szobahőmérsékleten, laboratóriumi körülmények között,

MTS gyártmányú elektrohidraulikus anyagvizsgáló berendezéssel. A terhelési frekvencia a vizsgálatok során változott, a repedésterjedés kétharmad részéig  $f = 20$  Hz frekvenciát alkalmaztunk, az utolsó harmadban pedig  $f = 5$  Hz frekvenciát. A terjedő repedést optikai módszerrel követtük, videokamera segítségével, 100x-os nagyítás mellett [2].



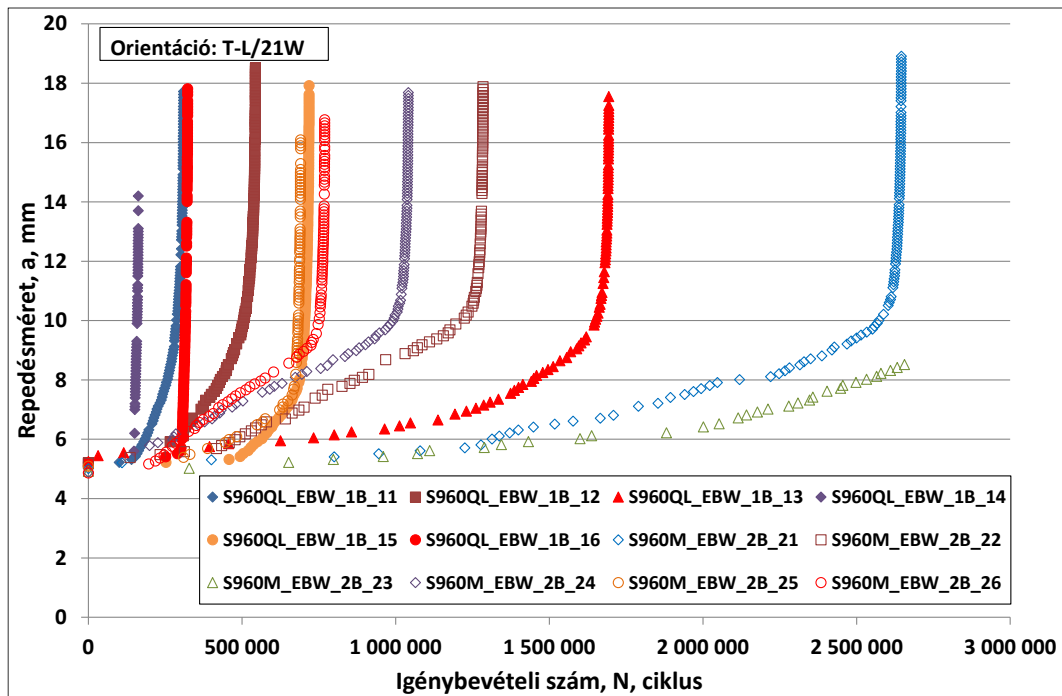
2. ábra. A kimunkált TPB próbatestek geometriája (a) és elhelyezkedése (b) a hegesztett kötésben

#### 4. Eredmények és következtetések

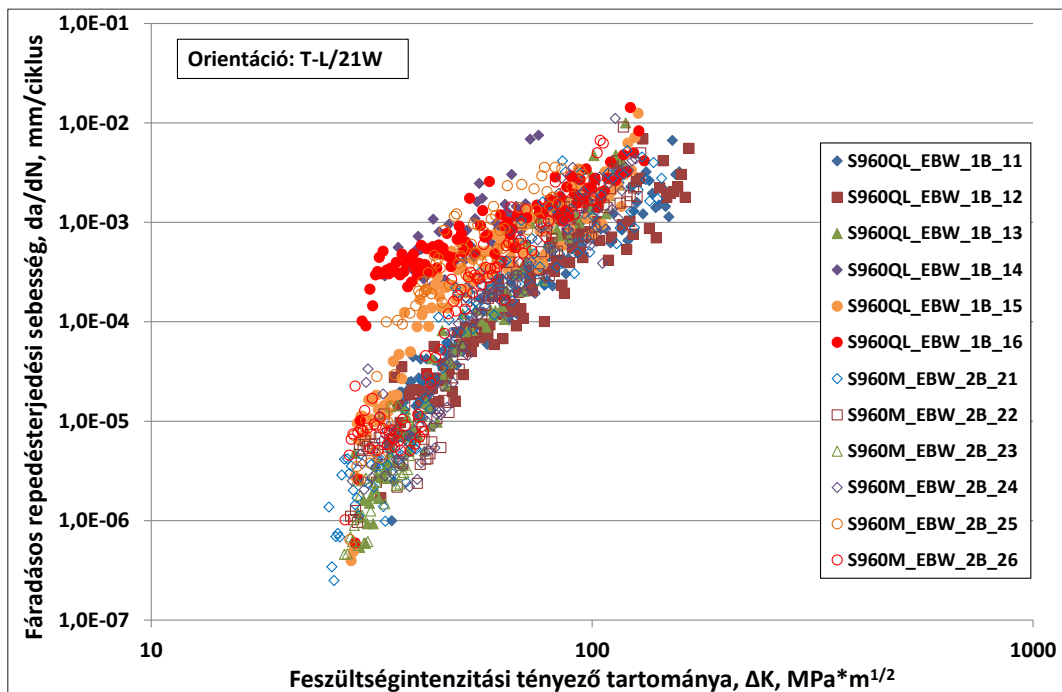
Az eredmények kiértékeléséhez az ASTM által kiadott [7] szabványt alkalmaztuk, amely a fáradásos repedésterjedéses vizsgálatok végrehajtására és értékelésére vonatkozik. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat legjobban jellemző Paris-Erdogan összefüggés (1) konstansainak ( $C$  és  $n$ ) meghatározását a legkisebb négyzetek módszerével végeztük [8]. Minden egyes kísérlet esetében meghatároztuk a feszültségintenzitási tényező tartományát ( $\Delta K$ ) és a fáradásos repedésterjedési sebesség ( $da/dN$ ) értékpárokat.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

A T-L/21W orientációra vonatkoztatva a két anyagminőség esetén a repedésméret-igénybevételi szám görbék a 3. ábrán, a kinetikai diagramok pedig a 4. ábrán láthatók. A Paris-Erdogan összefüggés elektronsugaras hegesztett kötések különböző részeire meghatározott konstansainak értékeit az S960QL esetében az 5., az S960M acél esetében a 6. táblázat tartalmazza. A táblázatok adataiból (elsősorban az  $n$  értékekből) látható a vizsgált hegesztett kötések különböző részeinek (varrat, összeolvadási vonal, hőhatásövezet) eltérő viselkedése ismétlődő igénybevétel esetén, valamint a vizsgált szilárdsági kategóriánál az eltérő alapanyag gyártástechnológia fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásra gyakorolt hatása. A vizsgálataink során kapott eredmények és azok kiértékelése alapján lehetőség nyílik fáradásos repedésterjedési határdiagramok meghatározására [9, 10].



3. ábra. A repedésterjedési sebesség vizsgálatok repedésméret-igénybevételi szám görbéi T-L/21W orientáció esetén



4. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok kinetikai diagramjai T-L/21W orientáció esetén

5. táblázat. A fáradási repedésterjedési vizsgálatok eredményei az S960QL acél esetén

Próbatest	W	B	a <sub>0</sub>	Repedés útja	n	C	Korrelációs együttható
	mm	mm	mm		mm/ciklus, MPam <sup>1/2</sup>	–	
<b>Próbatest elhelyezkedése: T-S/23W</b>							
1S_11	12,96	6,55	3,51	V	3,481	7,411E-11	0,9716
1S_12	12,97	6,56	3,54	V	2,468	1,502E-08	0,9508
1S_13	12,95	6,56	3,58	ÖV	3,061	1,014E-09	0,9675
1S_14	12,98	6,55	3,52	ÖV	1,977	1,534E-07	0,9198
1S_15	12,96	6,54	3,54	HHÖ	3,071	1,236E-09	0,9599
1S_16	12,96	6,53	3,61	HHÖ	1,330	2,870E-06	0,8347
<b>Próbatest elhelyezkedése: T-L/21W</b>							
1B_11	25,90	12,87	5,12	V	3,649	3,976E-11	0,9574
1B_12	25,93	12,87	5,22	V	3,866	1,292E-11	0,9468
1B_13	25,92	12,87	5,25	ÖV	5,791	6,381E-15	0,9665
1B_14	25,85	12,87	5,20	ÖV	2,631	2,184E-08	0,7083
1B_15	25,92	12,87	5,12	HHÖ	3,993	2,553E-11	0,9293
1B_16	25,84	12,87	5,21	HHÖ	2,062	1,897E-07	0,9245

6. táblázat. A fáradási repedésterjedési vizsgálatok eredményei az S960M acél esetén

Próbatest	W	B	a <sub>0</sub>	Repedés útja	n	C	Korrelációs együttható
	mm	mm	mm		mm/ciklus, MPam <sup>1/2</sup>	–	
<b>Próbatest elhelyezkedése: T-S/23W</b>							
2S_21	12,98	6,56	3,90	V	3,149	6,165E-10	0,9363
2S_22	12,98	6,56	3,94	V	3,131	7,767E-10	0,9294
2S_23	12,95	6,56	3,93	ÖV	3,814	4,408E-11	0,9557
2S_24	12,94	6,56	3,93	ÖV	3,704	4,833E-11	0,9479
2S_25	12,97	6,56	3,96	HHÖ	4,021	1,424E-11	0,9653
2S_26	12,97	6,54	3,98	HHÖ	2,290	2,314E-08	0,9497
<b>Próbatest elhelyezkedése: T-L/21W</b>							
2B_21	25,93	13,05	5,01	V	4,981	1,593E-13	0,9446
2B_22	25,94	13,05	5,19	V	5,192	6,125E-14	0,9575
2B_23	25,94	13,04	4,92	ÖV	6,722	1,340E-16	0,7651
2B_24	25,89	13,04	4,89	ÖV	5,341	3,755E-14	0,9431
2B_25	25,94	13,03	5,09	HHÖ	5,367	2,044E-11	0,8991
2B_26	25,94	13,05	4,87	HHÖ	5,548	3,465E-14	0,9560

## 5. Összefoglalás

A kapott eredmények és azok kiértékelése alapján az alábbi megállapítások tehetőek.

- Az alkalmazott hegesztési paraméterekkel és körülményekkel megfelelő minőségű hegesztett kötések hozhatók létre autogén elektronsugaras hegesztéssel.



- A vizsgált S960M acél elektronsugaras hegesztett kötéseinek fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása a vizsgált irányokban (21 és 23) szignifikánsan különböző, a vizsgált S960QL acél esetében ilyen különbség nincs.
- A vizsgált S960QL acél elektronsugaras hegesztett kötése, mindkét vizsgált irányban (21 és 23), lényegesen érzékenyebbek a fáradással terjedő repedések elhelyezkedésére (varrat, összeolvadási vonal, hőhatásövezet), mint a vizsgált S960M acél kötése.
- A kapott eredmények alapján fáradásos repedésterjedési határgörbék határozhatók meg a vizsgált hegesztett kötésekre.

## 6. Köszönetnyilvánítás

*Az elektronsugaras hegesztési kísérletek feltételeinek biztosításáért köszönet illeti a Steigerwald Strahltechnik Kft-ét (SST) és magyarországi partnervállalatát az IGM Robotrendszerek Kft-ét.*

## Irodalom

- [1] Balogh A., Lukács J. és Török I. (szerk.): Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai, Miskolci Egyetem, 2015. (ISBN 978-963-358-081)
- [2] Blacha S., Weglowski M. S. T., Dymek S. és Kopuscianski M.: Microstructural characterization and mechanical properties of electron beam welded joints of high strength steel grade S690QL, Archives of Metallurgy and Materials, 2016,61:1193-1200.  
<https://doi.org/10.1515/amm-2016-0198>
- [3] IIW-1823-07 Recommendations for fatigue design of welded joints and components, International Institute of Welding, 2008
- [4] Dobosy, Á.: S690QL és S960M nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseinek fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása, Multidiszciplináris Tudományok, 2020,10(1):156-166.  
<https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.1.19>
- [5] Mobark, H. F. H., Lukács, J.: Az alapanyag-hozaganyag párosítás hatása a fáradásos repedésterjedésre nagyszilárdságú acélok és hegesztett kötéseik esetén, Gépgyártás, 2019,58(1-2):76-80.
- [6] ASM International: Metals Handbook Volume 6.: Welding, Brazing and Soldering, 1995.
- [7] ASTM E 647: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, ASTM International, 2015.
- [8] Paris P. és Erdogan F.: A critical analysis of crack propagation laws Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, 1963:528-534. <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
- [9] Lukács J.: Fatigue crack propagation limit curves for high strength steels based on two-stage relationship, Engineering Failure Analysis, 2019,103:431-442.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.012>
- [10] Lukács J.: Repedést tartalmazó hegesztett kötések megbízhatósága ismétlődő igénybevétel esetén Kandidátusi értekezés, Miskolc-Budapest, 1992. p. 121