

## S690QL ÉS S960M NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTETT KÖTÉSEINEK FÁRADÁSOS REPEDÉSTERJEDÉSEL SZEMBENI ELLENÁLLÁSA

**Dobosy, Á.**

adjunktus, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [metda@uni-miskolc.hu](mailto:metda@uni-miskolc.hu)

### **Absztrakt**

Jelen kutatómunka célja S690QL és S960M alapanyagok és védőgázos fagyóelektródás ívhegesztett kötéseik fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásainak meghatározása. A hegesztési kísérletek során 15 mm vastag alapanyagokat alkalmaztunk, szimmetrikus X kötés kialakítás mellett. A paraméterek állandósága érdekében hegesztő szekátort használtunk, illetve WeldQAS folyamatfelügyelő rendszer segítségével ellenőriztük a hegesztési paramétereket. A repedésterjedési próbatetek úgy lettek kimunkálva, hogy azok a jellemző irányokra merőlegesek, illetve párhuzamosak legyenek, mind az alapanyag, mind a hegesztett kötések esetében, illetve ez utóbbi próbatetek esetében a bemetszések helyzetét is változtattuk. Ennek megfelelően a vizsgálataink során terjedő repedések a valós szerkezetekben előforduló, különböző repedés megjelenési helyeknek felelnek meg. A vizsgálati eredmények megfelelő módon kiválasztott értékeinek felhasználásával egy statisztikai módszer javasolható a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállás meghatározására.

**Kulcsszavak:** nagyszilárdságú acél, nemesített, termomechanikusan kezelt, fáradásos repedésterjedés, FCG

### **Abstract**

The research work aimed to determine the fatigue crack growth resistance of S690QL and S960M base materials and their GMAW welded joints. Welding experiments were performed on 15 mm thick plates, where symmetric X-groove multipass welds were made. Welding carriage and a monitoring system were used during the tests. The specimens were cut parallel and perpendicular to the characteristic directions of the materials and the welded joints; therefore the propagating cracks represent the different possible locations of the real cracks in the structural elements. With the selected values of the experimental results a statistical method can be proposed for determination of the fatigue crack growth resistance.

**Keywords:** high strength steel, quenched and tempered, thermomechanically rolled, fatigue crack growth, FCG

## **1. Bevezetés**

Napjainkban az acélipar egyik legalapvetőbb iránya a környezetre gyakorolt hatások csökkentése, más szavakkal a nyersanyagok felhasználásának mérséklése a sajáttömeg csökkentésével. Ez az anyagtudomány oldaláról megközelítve azt jelenti, hogy különböző nagyobb szilárdságú anyagokat kell felhasználni, mint például: nagyszilárdságú acélok, nagyszilárdságú alumínium ötvözetek, illetve kompozitok. A különböző acélszerkezetek esetében a legmeghatározóbb kötéstechológia a hegesztés, a hagyományos és modern, nagyteljesítményű ömlesztő hegesztő eljárások. Napjainkban a környezeti hatások csökkentése mellett, a megbízhatósági és biztonsági követelmények jelentősen szigorodtak. Mindemellett a statisztikai adatok azt mutatják, hogy a tönkremenetek harmada a hegesztett kötésekben jelentkezik, míg négyötödük ismétlődő igénybevételű szerkezetekben következik be [1].

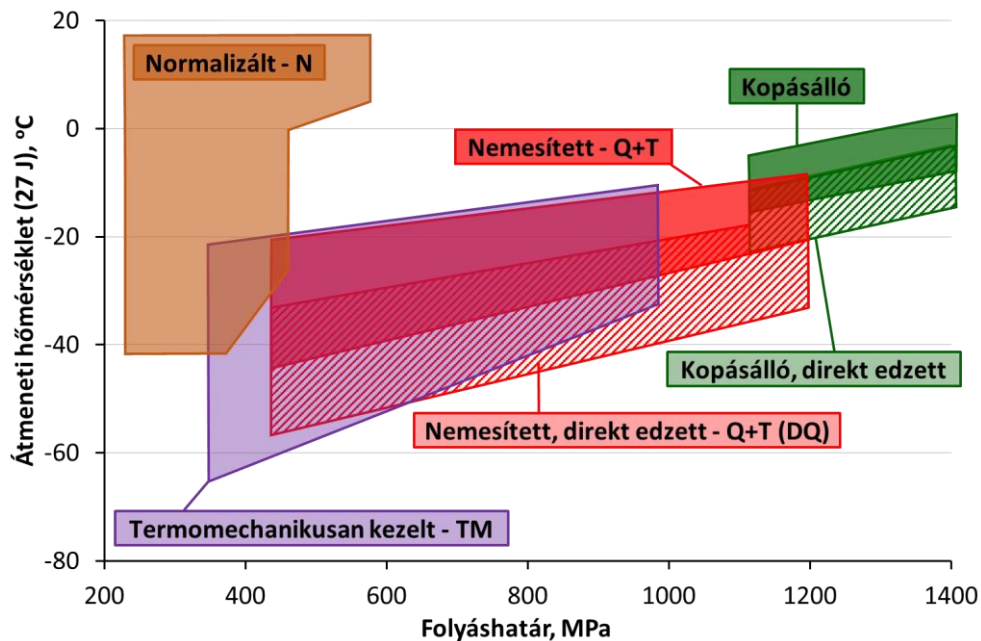
A hegesztés folyamata során az egyes elemeket hőhatás és mechanikai hatások érik, amelyek inhomogén szövetszerkezetű kötést eredményeznek. Ez az inhomogenitás a mikroszerkezeten túl a geometriai méretekre is hatással van; például az eltérő tulajdonságú részek alakváltozó képessége eltérő lehet. Ez a tulajdonságbeli inhomogenitás hegesztési eltéréseket, még gyakrabban hibákat eredményez. Ezen eltérések jelentősen meghatározzák a hegesztett kötések viselkedését és teherbírását. Az esetleges kötésihibák, anyagfolytonossági hibák kiemelt kockázatot jelentenek az ismétlődő igénybevételű terhelések esetében [1].

Mindezen jellemzők figyelembevételével, jelen cikkünkben az anyagok közül a nagyszilárdságú acélokra, a gyártástechnológiák közül a hegesztő eljárásokra, a terhelések közül pedig az ismétlődő igénybevételekre koncentráltunk.

A kísérleteinkhez védőgázos fagyóelektródás ívhegesztést választottunk, az ISO 4063 szabvány szerinti 135-ös eljárást, valamint a nagyszilárdságú acélok közül a nemesített S690QL és a termomechanikusan kezelt S960M alapanyagot. Az inhomogén szövetszerkezet és a lehetséges hibákból kifolyólag fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat (fatigue crack growth: FCG) választottunk az eltérések hatásának megállapítása érdekében. Statisztikai szemléletet követtünk mind a kísérletek tervezése, mind azok eredményeinek kiértékelése során. Ez lehetővé tette a kapott eredmények érvényességi tartományának kiszélesítését és az adatok megbízhatóságának növelését [2, 3, 4].

## **2. A nagyszilárdságú acélok hegeszthetősége**

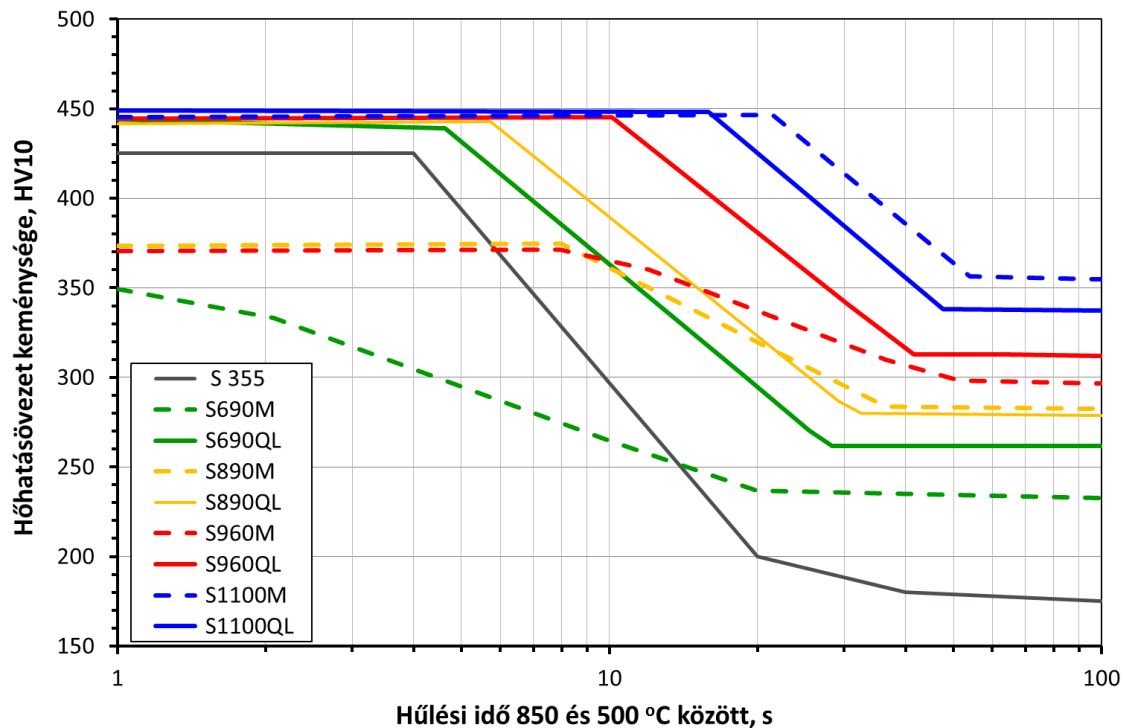
A fémes anyagok szilárdságának növelésére számtalan módszer áll rendelkezésre, így például: szemcseméret csökkentés, komplex fázisú szövetszerkezet előállítása (duplex fázis, triplex fázis, twip fázis), kiválásos keményítés. Azonban az általunk vizsgált szerkezeti acélok esetében, a falvastagságból adódóan, szemcseméret csökkentéssel, illetve a szövetszerkezet második fázisa jellemzőinek (minőség, méret, eloszlás) megváltoztatásával érhető el hatásosan a nagyobb szilárdság. A finomszemcsés nagyszilárdságú acélok közül a legnagyobb szilárdságot jelenleg a nemesített (quenched and tempered: Q+T), illetve a termomechanikusan alakított (thermomechanically rolled: TM) acélok képviselik. A Q+T acélokkal már elérhető az akár 1300 MPa garantált folyáshatár is, azonban a TM acélok ettől valamelyest elmaradnak, a jellemző folyáshatár nem haladja meg az 1100 MPa-t. Ugyanakkor az átmeneti hőmérsékletük kisebb, ennek megfelelően pedig az ütőmunkájuk kedvezőbb, mint a nemesített acéloké. Ez jól megfigyelhető az 1. ábrán. Továbbá, az elérhető lemezzvastagság is kisebb a TM acélok esetében mint a Q+T acéloknál [5].



1. ábra. Különböző finomszemcsés nagyszilárdságú acélok folyáshatára és átmeneti hőmérséklete [5]

A nagyszilárdságú acélok különlegessége, hogy előállításukat követően szövetszerkezetük nagyobb energiával rendelkezik, mint az egyensúlyi, így a gyártással járó hegesztési hőbevitel hatására a kialakult szövetszerkezet (jellemzően komplex ferrit rácsba ágyazott megeresztett bénit és martenzit) visszafordíthatatlanul megváltozhat.

A vizsgált nagyszilárdságú acélok esetében a sikeres hegesztés egyik legfontosabb jellemzője a vonalenergia ( $E_v$ ) nagysága hegesztés során [6, 7]. Amennyiben a vonalenergia túlzottan kis értékű, a varrat hűlési sebessége túlzottan gyors lehet, ami hidegrepedések kialakulását eredményezheti. Ezzel szemben, nagy vonalenergia esetén szemcsedurvással lehet számolni a hőhatásövezet kritikus zónáiban, ez pedig a szilárdsági és a szívóssági jellemzők csökkenését eredményezheti. Ebből következően csupán egy szűk hegesztési munkatartomány áll rendelkezésre ezen acélok hegesztése során, ezen kívül a kötés minősége nem garantálható [8]. Meg kell jegyezni, hogy a szűk munkatartományon belül érdemes a vonalenergia értéket alacsonyan tartani, a tapasztalatok szerint, ugyanis kisebb érték mellett kedvezőbb lesz a kötés szilárdsága, szívóssága és a maradó feszültségek nagysága. Mindezek mellett az előmelegítés minimális hőmérséklete, illetve a maximális rétegeközi hőmérséklet is hatással van a kialakuló varrat jellemzőire, ezek együttesen határozzák meg a kialakuló kötés jellemzőit. Mindezen tényezők együttes figyelembevételére a gyakorlatban a kritikus hűlési időt ( $\Delta t_{8,5/5}$ ) alkalmazzák. Ennek értéke szintén szűk tartományban változhat csupán a nagyszilárdságú acélok esetében, a jellemző tartomány 6 – 15 s [9]. Tekintve, hogy ez a mérőszám a varrat hűlési idejét és így a hűlés sebességét jellemzi, így közvetlenül összefügg a kialakuló szövetszerkezettel, vagyis a kialakuló varrat tulajdonságokkal. Ennek megfelelően, keménységméréssel ellenőrizhető (hegesztést követően) a kialakult szövetszerkezet, amelyből következtetni lehet a vonalenergia nagyságára és így az alkalmazott hegesztési paraméterekre. A hűlési idő nagysága és a hőhatásövezetben kialakuló maximális keménység értékek közötti összefüggést szemlélteti a 2. ábra [10].



2. ábra. A hűlési idő nagysága és a hőhatásövezetben kialakuló maximális keménység kapcsolata ( $s = 5 \text{ mm}$ ) [10]

Az eddig említett tényezők mellett a nagyszilárdságú acélok hegesztése során jelentkező további nehézség a hozaganyag megfelelő megválasztása. Ez a nagy alapanyag szilárdság miatt igen nehéz feladat, ugyanis a rendelkezésre álló hozaganyagok közül nem sok éri el a szükséges szilárdságot. Az alapanyag és a hozaganyag mechanikai jellemzőinek (elsősorban a folyáshatár) arányát figyelembe véve beszélhetünk matching (m), overmatching (om) és undermatching (um) esetekről. Matching hozaganyag párosítás esetén a hegesztett kötés mechanikai jellemzői megegyeznek, vagy közel azonosak az alapanyag jellemzőivel. Undermatching esetben a varrat mechanikai jellemzői elmaradnak az alapanyag jellemzőitől, míg az overmatching esetben meghaladják az alapanyag tulajdonságait. Azonban a hegesztett kötésnek mindhárom esetben teljesíteni kell a vonatkozó szabványokban rögzített minimum szilárdsági követelményeket.

Általánosan elfogadott elv, hogy a melegen hengerelt acélok esetében közel azonos tulajdonságú, esetleg kissé nagyobb folyáshatárú, matching hozaganyag párosítást alkalmaznak. A nagyobb szilárdságú, overmatching hozaganyag párosítás esetén ugyanakkor nagyobb maradó feszültségek kialakulásával kell számolni, ami természetesen kedvezőtlen a hegesztett kötések esetében. Nagyszilárdságú acélok esetében (a folyáshatár jellemzően magasabb mint 700 MPa) előnyösebb undermatching hozaganyag párosítást alkalmazni, még akkor is, ha rendelkezésre áll matching hozaganyag az adott szilárdsági kategóriában [5, 11]. Természetesen ebben az esetben kisebb szilárdságú varrat képződik, azonban számos pozitív hatással számolhatunk, mint például a varrat nagyobb szívóssága, a hidegrepedéssel (hidrogénrepedéssel) szembeni nagyobb ellenállóképesség, illetve a kisebb maradó feszültségek kialakulása. Mindezen hatások mellett a varrat elhelyezkedése a hegesztett szerkezetben is meghatározó. A teherviselő, illetve a szerkezet szempontjából kritikus helyeken elhelyezett varratok eseté-

ben elengedhetetlen, hogy a kötés szilárdsága elérje az alapanyag szilárdságát. Ugyanakkor nem teherviselő, illetve kevésbé igénybevett helyeken kisebb szilárdságú kötések is elegendőek lehetnek [10]. Másrészt, a nagyobb varrat szilárdságból adódóan overmatching párosítás is alkalmazható bizonyos esetekben. Ilyenkor a nagyobb folyáshatár ellensúlyozza a nagyobb maradó feszültség lehetőségét, a kisebb szívósságot vagy a fáradási, jelen esetben az FCG-vel szembeni ellenállás romlását. Meg kell azonban jegyezni, hogy ilyen esetben a fáradási jellemzők romlásának aránya (amennyiben bekövetkezik) nem ismert; jelen cikkben éppen ezért koncentráltunk ezen jellemzők vizsgálatára. Overmatching párosítást tehát csak indokolt esetben, jellemzően vegyes szilárdságú kötések esetében ajánlott alkalmazni, például 690 MPa és 960 MPa szilárdsági kategóriájú acélok hegesztésénél. Ebben az esetben a két kategória közé eső hozaganyagot kell választani, ami a kisebb szilárdságú alapanyag szempontjából overmatching, míg a nagyobb szilárdságú szempontjából undermatching párosítás.

### 3. Kísérleti eljárás

#### 3.1. Vizsgált anyagok

A vizsgálatainkhoz SSAB Weldox 700E nemesített (S690QL kategóriájú, a továbbiakban: Weldox 700E) és VOESTALPINE Alform 960M termomechanikusan kezelt (S960M kategóriájú, a továbbiakban: Alform 960M) acélokat választottunk, 15 mm-es lemezvastagsággal. Az 1. táblázat tartalmazza az alapanyagok mechanikai jellemzőit, kiegészítve a hegesztési kísérleteknél alkalmazott hozaganyagok mechanikai jellemzőivel. A táblázatban található adatok az adott műbizonylatokban szereplő értékeket reprezentálják.

A Weldox 700E alapanyag hegesztése során THYSSEN Union X85 (EN ISO 16834-A: G 79 5 M21 Mn4Ni1,5CrMo, a továbbiakban: X85) és THYSSEN Union X90 (EN ISO 16834-A: G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo, a továbbiakban: X90) hozaganyagokat alkalmaztunk. Az Alform 960M alapanyag esetében szintén X90 és THYSSEN Union X96 (EN ISO 16834-A: G 89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo, a továbbiakban: X96) hozaganyagokat.

*1. táblázat. A vizsgálat alapanyagok és hozaganyagok mechanikai jellemzői*

Jelölés	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %	$KV_{-40\text{ °C}}$ , J
Weldox 700E	791	836	17	165
Alform 960M	1051	1058	17	177
X85	$\geq 790$	$\geq 880$	$\geq 16$	$\geq 53$
X90	$\geq 890$	$\geq 950$	$\geq 15$	$\geq 58$
X96	$\geq 930$	$\geq 980$	$\geq 14$	$\geq 40$

A vizsgált alapanyagok vegyi összetétele a 2. táblázatban látható, ismételten kiegészítve a hozaganyagok vegyi összetételével, a műbizonylatokban szereplő adatok alapján. Amint az megfigyelhető, az alapanyagok átlagos karbon tartalma kisebb, mint a hagyományos szerkezeti acéloké, a termomechanikusan kezelt alapanyagoké pedig még alacsonyabb. Megvizsgálva a többi kémiai elemet azonban nem fedezhető fel szignifikáns különbség az összetételekben, csupán kismértékű eltéréseket találunk, elsősorban az alábbi elemek esetében: Mn, Cr és Ni. Tehát megállapítható, hogy a vizsgált acélok esetében a szilárdságnövelés nem (vagy nem csak) az ötvözöttséggel érhető el, hanem az összetett gyártástechnológiával.

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

Jelölés	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Ti	V	Cu	Al
Weldox 700E	0,14	0,30	1,13	0,30	0,17	-	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,03
Alform 960M	0,09	0,32	1,63	0,59	0,29	0,03	0,01	0,01	0,02	-	-	0,04
X85	0,07	0,68	0,61	0,29	0,61	1,73	0,01	0,01	0,08	0,01	0,06	0,01
X90	0,10	0,80	1,80	0,35	0,60	2,30	-	-	-	-	-	-
X96	0,12	0,80	1,90	0,45	0,55	2,35	-	-	-	-	-	-

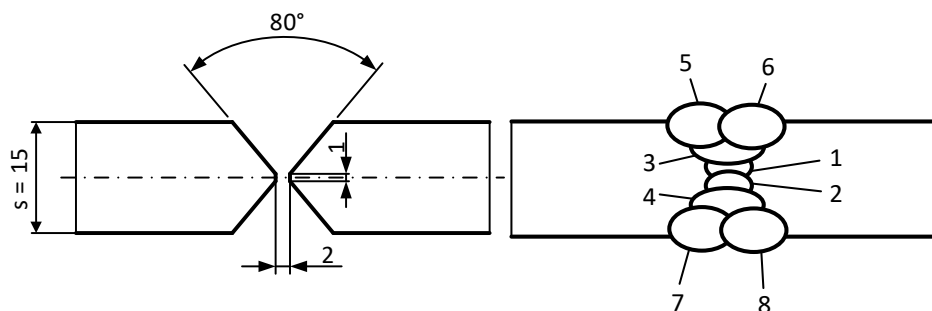
A hegesztési kísérletek során a hozaganyag választás szempontjából több esetet is megvizsgáltunk. Az egyes alapanyagoknál alkalmazott hozaganyagok párosítása a 3. táblázatban látható.

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

Alapanyag	Hozaganyag	Hozaganyag párosítás
Weldox 700E	X85	matching (m)
Weldox 700E	X90	overmatching (om)
Alform 960M	X96	matching (m)
Alform 960M	X90	undermatching (um)

### 3.2. Kísérleti körülmények

Védőgázos fagyóelektrodás ívhegesztést (135) választottunk a kísérleteinkhez, tekintve, hogy az iparban ezen acélok gyártásához ez az elterjedt eljárás. Ugyancsak ipari tapasztalatok alapján M21 (MSZ EN ISO 14175) összetételű kevert védőgázt választottunk, 18% CO<sub>2</sub> + 82% Ar összetétellel [12]. A huzalelektroda átmérője minden esetben 1,2 mm volt. A szimmetrikus hőbevitel és feszültségeloszlás érdekében X varratkialakítást alkalmaztunk, 80°-os leélezési szöggel, 1,5 mm illesztési réssel, 8 varratsorral (a kötés kialakítása és a hegesztési sorrend a 3. ábrán látható) és a sorok közötti rendszeres forgatással [5].



3. ábra. Kötés kialakítása és hegesztési sorrend

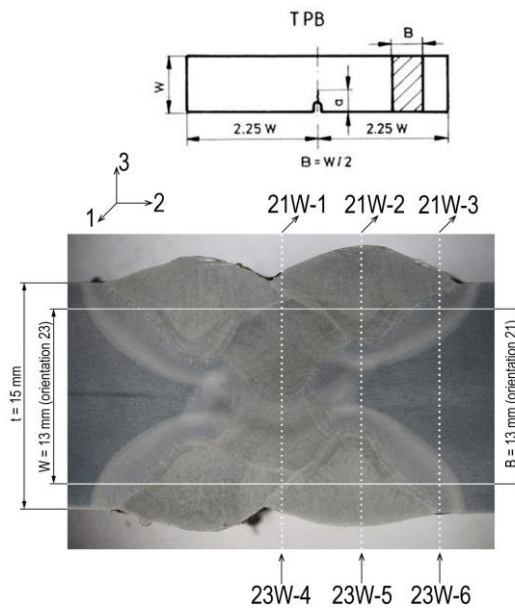
A hegesztő berendezés egy DAIHEIN VARSTROJ P500L áramforrás volt, 500 A maximális névleges feszültséggel. Minden esetben 300 mm x 125 mm x 15 mm dimenziójú lemezeket használtunk a kötések elkészítésénél. A gyöksorokat minősített hegesztő készítette, míg a töltő és takaró sorokat hegesztő szekátor segítségével készítettük el. A hegesztési kísérletek szempontjából kritikus hegesztési paramétereket úgy választottuk meg, hogy a kritikus hűlési idő minden esetben 6 és 15 s közé es-

sen. A hegesztési paramétereket folyamatosan rögzítettük és ellenőriztük. Ezek betartásával a vonalenergia értéke 800 és 1200 J/mm között változott. Az alkalmazott hegesztési paraméterek a 4. táblázatban láthatóak, ahol az áramerősség (I), a hegesztési feszültség (U) és a hegesztési sebesség ( $v_h$ ) mellett, az előmelegítési ( $T_e$ ) és rétegeközi hőmérsékleteket ( $T_r$ ) is feltüntettük, a számított vonalenergia ( $E_v$ ) és kritikus hűlési idővel ( $\Delta t_{8,5/5}$ ) együtt. A györsorok esetében alkalmazott eltérő paramétereket minden esetben külön jelöltük. A hegesztést követően utókezelést nem alkalmaztunk a varratokon [13].

4. táblázat. Az alkalmazott hegesztési paraméterek

Alapanyag	Sor	$T_e, ^\circ\text{C}$	$T_r, ^\circ\text{C}$	I, A	U, V	$v_h, \text{cm/min}$	$E_v, \text{J/mm}$	$\Delta t_{8,5/5}$
Weldox 700E	1-2	150	-	130-140	19-21	20	700-750	7-8
	3-8	-	180	280-300	28-29	40	1000-1100	9-11
Alfrom 960M	1-2	60	-	130-140	19-21	20	700-750	7-8
	3-8	-	150	260-310	25-32	40	900-1400	7-15

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz a hegesztett kötésekből és az alapanyagokból TPB (three point bend) próbatesteket munkáltunk ki, amelyek jellemző  $W$  mérete 28 mm, illetve a kisebb próbatesteknél 14 mm volt. A próbatest kialakítása a 4. ábrán látható.



4. ábra. A TPB próbatest kialakítása és a bemetszések elhelyezkedése

Az alapanyag esetében, a hengerlési iránynak megfelelően három féle módon munkáltuk ki a próbatesteket; T-L, L-T és L-S irányokban (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). T-L próbatest: a bemetszés iránya megegyezik a hengerlési iránnyal, L-T próbatest: a bemetszés iránya merőleges a hengerlés irányára, L-S próbatest: a bemetszés lemezzvastagságvastagság irányú. A hegesztett kötéseknél a bemetszések elhelyezkedését a 4. 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, egy irányon belül.

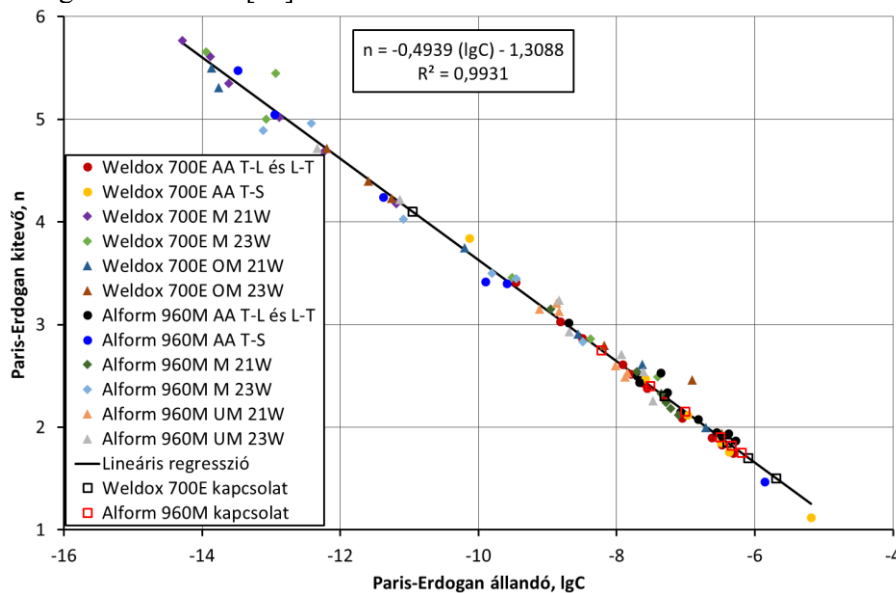
Az FCG vizsgálatok esetében húzó igénybevételt alkalmaztunk,  $R = 0,1$  terhelés aszimmetria tényezővel, szinusz alakú terhelésfüggvénnyel, szobahőmérsékleten, laboratóriumi körülmények között, MTS gyártmányú elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezéssel. A terhelési frekvencia a vizsgálatok során 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 [5].

#### 4. Eredmények és következtetések

Az eredmények kiértékeléséhez az ASTM által kiadott [14] szabványt alkalmaztuk, amely a fáradásos repedésterjedés 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 [15]. Minden egyes kísérlet esetében meghatároztuk a feszültségintenzitási tényező tartománya ( $\Delta K$ ) és a fáradásos repedésterjedési sebesség ( $da/dN$ ) értékpárokat. Háromszor két darab próbatestet használtunk az alapanyagok esetében, T-L, L-T és L-S irányokban (összesen 12 darab próbatestet), míg kétszer három darab próbatestet a hegesztett kötések esetén, 21W és 23W irányokban, hozaganyag párosításonként (összesen 24 darab próbatestet).

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

A vizsgálataink során kapott eredmények és azok kiértékelése alapján a fáradásos repedésterjedési határdiagramok meghatározhatóak [16].



5. ábra. Összefüggés a Paris-Erdogan egyenlet konstansa ( $C$ ) és kitevője ( $n$ ) között a vizsgált anyagok esetén (AA: alapanyag, M: matching párosítás, OM: overmatching párosítás, UM: undermatching párosítás)



A határgörbék meghatározása az említett irodalom alapján hat lépésben történik. Ennek során szükséges az eloszlásfüggvény típusának megválasztása (esetünkben Weibull eloszlás), valamint annak paramétereinek meghatározása. A határgörbék karakterisztikus értékeinek ( $n$ ,  $C$ ,  $\Delta K_{fc}$ ) megválasztásakor figyelembe vettük az anyagjellemzők befolyásoló hatását az élettartamra [17]. A Paris-Erdogan összefüggés kitevője ( $n$ ) a Weibull eloszlásfüggvény 5%-os valószínűséghez tartozó értéke, míg a ciklikus törési szívósság ( $\Delta K_{fc}$ ) szintén a Weibull eloszlásfüggvény 5%-os valószínűséghez tartozó értéke. A Paris-Erdogan összefüggés állandója ( $C$ ) a  $C$  és  $n$  értékek közötti korrelációs kapcsolatból számítható érték, amely egy egyenes és az 5. ábrán látható. A befejező lépés a határgörbék tényleges paramétereinek meghatározása a BS 7910 [18] irodalom alapján.

A meghatározott határdiagramok paramétereit az 5. táblázatban foglaltuk össze. Azokban az esetekben, amikor a terjedő repedés iránya és/vagy útja ismert a táblázatban szereplő adatok közvetlenül használhatóak. Azokban az esetekben, amikor az irány és/vagy út nem ismert, az összetartozó értékek közül a kisebbet kell figyelembe venni (az 5. táblázatban szürkén kiemelt sorok, például: T-L és L-T vagy T-S irány, 21W vagy 23W irány). A határgörbék egyértelmű meghatározása a küszöbérték közelében igen nehéz feladat. Amikor a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke ( $\Delta K_{th}$ ) nem ismert irodalmi adatok használhatóak, például [19]. Ugyanakkor a  $\Delta K_{th}$  értékét csökkentheti a húzó maradó feszültségek jelenléte, illetve növelheti a nyomó maradó feszültség jelenléte. Ilyen például a hegesztés során jelentkező maradó feszültségek esete.

5. táblázat. A fáradási repedésterjedési határgörbék meghatározott paramétereit

Alapanyag	Hozaganyag párosítás	Bemetszés iránya	A Paris-Erdogan törvény paramétereit		Ciklikus törési szívósság
			n	C	$\Delta K_{fc}$
			mm/ciklus, MPam <sup>1/2</sup>		MPam <sup>1/2</sup>
Weldox 700E	alapanyag	T-L és L-T	1,70	$8,09 \cdot 10^{-7}$	101
		T-S	1,50	$2,06 \cdot 10^{-6}$	75
	matching	21W	4,10	$1,12 \cdot 10^{-11}$	105
		23W	2,30	$4,93 \cdot 10^{-8}$	80
	overmatching	21W	1,85	$4,02 \cdot 10^{-7}$	96
		23W	1,90	$3,19 \cdot 10^{-7}$	61
Alfrom 960M	alapanyag	T-L és L-T	1,82	$4,63 \cdot 10^{-7}$	116
		T-S	1,75	$6,41 \cdot 10^{-7}$	87
	matching	21W	1,90	$3,19 \cdot 10^{-7}$	114
		23W	2,75	$6,06 \cdot 10^{-9}$	82
	undermatching	21W	2,40	$3,10 \cdot 10^{-8}$	115
		23W	2,15	$9,93 \cdot 10^{-8}$	67

## 5. Összefoglalás

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

- Az alkalmazott hegesztési paraméterekkel és körülményekkel megfelelő minőségű hegesztett kötések hozhatók létre.
- A Paris-Erdogan összefüggés kitevőjének ( $n$ ) átlagos értéke a két alapanyag esetében szignifikánsan nem különbözött a T-L és L-T irányokban, ami azonos fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállást jelent. Ugyanakkor az  $n$  értéke T-S irányban szignifikánsan különbözött minden esetben, a Weldox 700E alapanyag ellenállása ebben az irányban kedvezőtlenebb.
- Az alapanyag szilárdsági kategóriája (700 és 960) és gyártástechnológiája (Q és M) jelentős hatással van a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásra.
- Az  $n$  átlagos értékei a hegesztett kötések esetében, függetlenül a hozaganyag párosítástól, statisztikailag nagyobbak voltak, mint az adatott alapanyagok esetében. A Weldox 700E overmatching kötés  $n$  értéke kisebb, mint a matching kötése, vagyis a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállás overmatching esetben rosszabb.
- Az Alfrom 960M matching kötés  $n$  értéke kisebb, mint az undermatching kötésé, vagyis a matching párosítás rosszabb ellenállással rendelkezik, mint az undermatching kötés.
- A kapott eredmények alapján és az alkalmazott módszerek segítségével a fáradásos repedésterjedési határgörbék a vizsgált alapanyagokra és azok hegesztett kötéseire biztonsággal meghatározhatóak.
- Ugyanakkor további vizsgálatok szükségesek a statisztikailag még megbízhatóbb eredmények és a hegesztéstechnológia hatásainak még átfogóbb megismerése érdekében.

## 6. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## Irodalom

1. IIW-1823-07 2008 Recommendations for fatigue design of welded joints and components (International Institute of Welding, USA)
2. Maros M. B.: Contribution to the Physical Understanding of the Manson-Coffin Law Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials 1998, New York Elsevier, pp 99-104. <https://doi.org/10.1016/B978-008043326-4/50022-2>
3. Alus H., Katz Y., Maros M. B. and Tóth L.: Some insights into the remote strain vs. fatigue life relationship Journal of Materials Processing Technology 2004, 157-158:16-22. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.003>
4. Lukács J.: Dimensions of lifetime management Materials Science Forum 2005, 473-474:361-368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.361>
5. Balogh A., Lukács J., Török I. (szerk.) Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai. 2015 ISBN 978-963-358-081

6. Blacha S., Weglowski M. S. T., Dymek S., Kopuscianski M.: Microstructural characterization and mechanical properties of electron beam welded joints of high strength steel grade S690QL Arch. Metall. Mater. 2016, 61:1193-1200. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0198>
7. Gáspár M., Balogh A.: Efficient Increase of the Productivity of GMA Welding of AHSS Using Flux Cored Wire Design, Fabrication and Economy of Metal Structures: International Conference Proceedings 2013, pp 463-468. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36691-8\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36691-8_70)
8. ASM International 1995 Metals Handbook Volume 6.: Welding, Brazing and Soldering
9. Gáspár M., Balogh A., Sas I.: Physical simulation aided process optimisation aimed sufficient HAZ toughness for quenched and tempered AHSS Proceedings of the IIW 2015 International Conference: High Strength Steels - Challenges and Applications IIW-2015-1504 p.7
10. Rauch R., Schnitzer R.: Alform welding system, Voestalpine informant (Alform Welding Day, June 2012)
11. Gáspár M., Sisodia R. P. S.: Weldability analysis of Q+T and TMCP high strength steels by physical simulation Proceedings of IIW 2017 International Conference: Green Welding Technologies for Effective and Reliable Manufacturing pp B166-B170
12. Willms R.: High strength steel for steel constructions Nordic Steel Construction Conference 2009, pp.597-604.
13. Lukács J., Gáspár M.: Fatigue crack propagation limit curves for high strength steels and their application for engineering critical assessment calculations Advanced Materials Research 2014, 891-892:563-568. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.563>
14. ASTM E 647 1998 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates
15. Paris P., Erdogan F.: A critical analysis of crack propagation laws Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME 1963, 85(4):528-534. <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
16. Lukács J.: Fatigue crack propagation limit curves for different metallic and non-metallic materials Materials Science Forum 2003, 414-415:31-36. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.414-415.31>
17. Lukács J.: Repedést tartalmazó hegesztett kötések megbízhatósága ismétlődő igénybevétel esetén. Kandidátusi értekezés, 1992. Miskolc-Budapest p. 121
18. BS 7910 1999 Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures
19. Lukács J., Nagy Gy., Harmati I., Fótos R., Koncsik Zs.: Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből. Miskolci Egyetem, Miskolc 2012 ISBN 978-963-358-000-4