

KÉT ALUMÍNIUMÖTVÖZET LINEÁRIS DÖRZSHEGESZTÉSSEL KÉSZÜLT KÖTÉSEINEK VISELKEDÉSE ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTEL ESETÉN

BEHAVIOUR OF FRICTION STIR WELDED JOINTS MADE OUT OF TWO ALUMINIUM ALLOYS UNDER CYCLIC LOADING CONDITIONS

Meilinger Ákos*, Dr. Lukács János**

ABSTRACT

The friction stir welding (FSW) is a dynamically developing version of the pressure welding processes. Nowadays, the knowing of the properties and the behaviour of the welded joints is an important direction of the investigations, especially under cyclic loading. The research work aimed (i) to demonstrate the behaviour of the friction stir welded joints under cyclic loading conditions; (ii) to determine fatigue limit or design curves for aluminium alloys and their welded joints made by FSW process. Experiments were performed on 5754-H22 and 6082-T6 aluminium alloys and their welded joints. Both high cycle fatigue (HCF) and fatigue crack propagation (FCG) tests were executed on both base materials and their welded joints. Statistical behaviour of the base materials and welded joints was represented by the cutting of the specimens and the using of different crack paths. HCF limit curves were determined based on staircase method. FCG limit curves can be determined by own developed six step method. The investigations and their results were compared with each other and with the results can be found in the literature.

1. Bevezetés

Az alumíniumötvözetek szerepe a szerkezeti alkalmazásokban napjainkra megkérdőjelezhetetlenné vált. A repülés, a járműipar [1], a hídszerkezetek [2] stb. területén egyre több céllal és egyre nagyobb mennyiségben használnak alumíniumötvözeteket. A különféle anyagfejlesztések (például [3]) egyik törekvése is az, hogy az alkalmazási tartomány minél szélesebb lehessen, kielégítve ezzel a legváltozatosabb felhasználói igényeket.

Az anyagfejlesztések mellett, azokkal szoros kapcsolatban, technológiafejlesztésekre is szükség van,

legalább a felhasználói követelmények – benne a biztonsági követelmények – teljesíthetősége és a gazdaságosság szempontjainak kielégítése okán. Nincs ez másképp a hegesztéstechnológiák területén sem, ahol a lineáris dörzshegesztés (FSW), megalkotása (1991) óta [4] az egyik legdinamikusabban fejlődő sajtoló hegesztő eljárás [5]. Az anyagfejlesztés technológiafejlesztést indukál (például [6]) és ennek fordítottjára is találhatunk példákat.

A különféle szerkezeti alkalmazások esetében a terhelés igen gyakran ismétlődő jellegű, a károsodások (tönkremenetek) között a kisciklusú fáradás (LCF), a nagyciklusú fáradás (HCF) és a fáradásos repedésterjedés (FCG) egyaránt előfordul. Tekintettel az ismétlődő igénybevétel esetén bekövetkezett károsodások és káresetek jelentős súlyára, indokolt ezeket az igénybevételeket a vizsgálatok középpontjába állítani.

Jelen közleményünk célja két alumíniumötvözet (5754-H22 és 6082-T6) és lineáris dörzshegesztéssel készített hegesztett kötéseik ismétlődő igénybevételekkel (HCF és FCG) szembeni ellenállásának bemutatása. Saját megfontolásainkat és eredményeinket irodalmi adatokkal is összehasonlítjuk, továbbá utalunk az ismétlődő igénybevételekkel szembeni tervezési határgörbék származtatásának lehetőségeire is.

2. Anyagminőségek, hegesztett kötések, vizsgálati körülmények

A vizsgálatokra két csoportba (5xxx és 6xxx) tartozó alumíniumötvözet alapanyagon és azok FSW hegesztett kötéseik került sor. A vizsgált és az összehasonlításra használt anyagok vegyi összetételét, vastagságát és alapvető mechanikai tulajdonságait az 1. és a 2. táblázatok tartalmazzák.

* tanársegéd,

** egyetemi tanár

Alapanyag	Mg	Si	Zn	Cu	Mn	Fe	Cr	Ti	Referencia
5754-O	3,3	0,19	0,08	0,03	0,34	0,2	–	–	[7]
5754	2,854	0,095	–	0,028	0,316	0,239	0,011	–	[9]
AlMg3	2,95	0,179	0,044	0,022	0,277	0,301	0,043	0,04	jelen cikk
5754-H22	2,8	0,26	0,06	0,04	0,32	0,31	0,05	0,03	jelen cikk
6082-T6	0,6	0,91	0,01	0,01	0,45	0,18	<0,01	0,01	[12]
6082-T6	0,59	0,96	<0,01	<0,01	0,45	0,19	<0,01	0,01	[12]
6082-T6	0,6	1,1	0,03	0,02	0,46	0,19	0,08	0,03	jelen cikk

1. táblázat. A vizsgált és az összehasonlításra használt anyagok vegyi összetétele (tömeg%).

Alapanyag	Falvastagság	Folyáshatár	Szakítószilárdság	Nyúlás	Referencia
	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	
5754-O	3	170	253	12,3	[7]
5754-H22	3	–	235	15,0	[8]
5754	4	165	252	17,6	[9]
AlMg3	12	128	218	–	jelen cikk
5754-H22	6	190	239	14,5	jelen cikk
6082-T6	3	276	323	12,5	[10]
6082-T6	5	260	310	–	[11]
6082-T6	5,8	130-135	220	–	[12]
6082-T6	4	291	317	11,3	[12]
6082-T6	6	267	305	20,0	jelen cikk

2. táblázat. A vizsgált és az összehasonlításra használt anyagok vastagsága és mechanikai tulajdonságai.

Az FSW kötések marógépen, saját tervezésű szerszámmal készültek. Az összehasonlításra használt és a vizsgált anyagok FSW kötéseinek technológiai paramétereit a 3. és a 4. táblázatok foglalják össze. Amint azt a 3. és a 4. táblázatok adatai mutatják, az

általunk alkalmazott technológiai paraméterek részben eltérnek a más szerzők által közölt adatoktól. Ez a tény megerősíti azt a tapasztalatot, hogy az FSW eljárás során többféle paraméter kombinációjával is elérhető megfelelő minőségű hegesztett kötés.

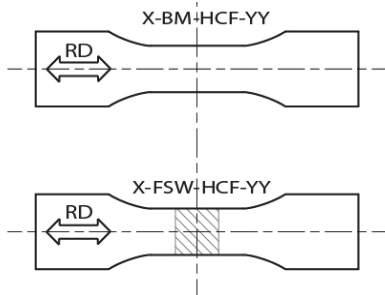
Alapanyag	Falvastagság	Hegesztési sebesség	Fordulatszám	Váll átmérő	Szerszám dőlésszög	Referencia
	mm	mm/min	rpm	mm	°	
5754-O	3	13	700; 1100	15	2	[7]
5754-H22	3	15; 20; 25	2000; 3000	18	–	[8]
5754-H22	6	100	400	16	2	jelen cikk
6082-T6	3	800	1500	15	2	[10]
6082-T6	5	115; 170; 260; 390; 555	330; 460; 630; 880; 1230; 1700	19	–	[11]
6082-T6	5,8	350	1000	–	–	[12]
6082-T6	4	700; 1400	2200; 2500	14	–	[12]
6082-T6	6	100	400	16	2	jelen cikk

3. táblázat. Az összehasonlításra használt és a vizsgált anyagok FSW hegesztésének technológiai paramétereit I.

Alapanyag	Falvastagság	Tű átmérő	Tű hossz	Tű geometria	Referencia
	mm	mm	mm	–	
5754-O	3	5/2	2	csónka kúp, menetes	[7]
5754-H22	3	6	2	menetes	[8]
5754-H22	6	8/4	5,7	lépcsős	jelen cikk
6082-T6	3	6	–	menetes	[10]
6082-T6	5	M6	4,8	menetes	[11]
6082-T6	5,8	–	–	–	[12]
6082-T6	4	6	–	–	[12]
6082-T6	6	8/4	5,7	lépcsős	jelen cikk

4. táblázat. Az összehasonlításra használt és a vizsgált anyagok FSW hegesztésének technológiai paramétereit II.

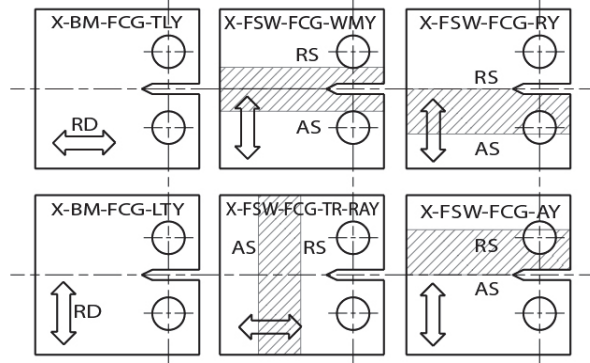
A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokhoz alkalmazott lapos próbatetek geometriáját az 1. ábra mutatja. (Jelölések: RD = hengerlési irány, X = alumínium anyagcsoport, BM = alapanyag, YY = a próbatest sorszama.) Az alapanyagokhoz és az FSW kötésekhöz alkalmazott próbatetek geometriája azonos volt, az FSW kötéseken nem végeztünk sem utóhőkezelést, sem forgácsolást (as-welded condition). A vizsgálatokra húzó terheléssel, $R = 0,1$ terhelés aszimmetria tényezővel, szinusz alakú terhelési függvényvel, szobahőmérsékleten és laboratóriumi környezetben, MTS gyártmányú elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezésen került sor. A terhelési frekvencia $f = 30$ Hz volt.



1. ábra. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokhoz (HCF) alkalmazott próbatetek kialakítása.

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat CT próbatetekeken végeztük ($W = 50$ mm), a bemetszés elhelyezkedését a hengerlési irányhoz és a hegesztett kötés hossztengetyéhez viszonyítva a 2. ábra szemlélteti. (Jelölések: TL = T-L orientáció, LT = L-T orientáció, WM = varratfém, TR = keresztirány, AS és A = előre oldal, RS és R = hátra oldal, RA = hátra oldal felől előre oldal felé.) Ahogy azt a 2. ábra mutatja, a bemetszések elhelyezése, illetve a repedések terjedése reprezentálta a legfontosabb és legjellemzőbb

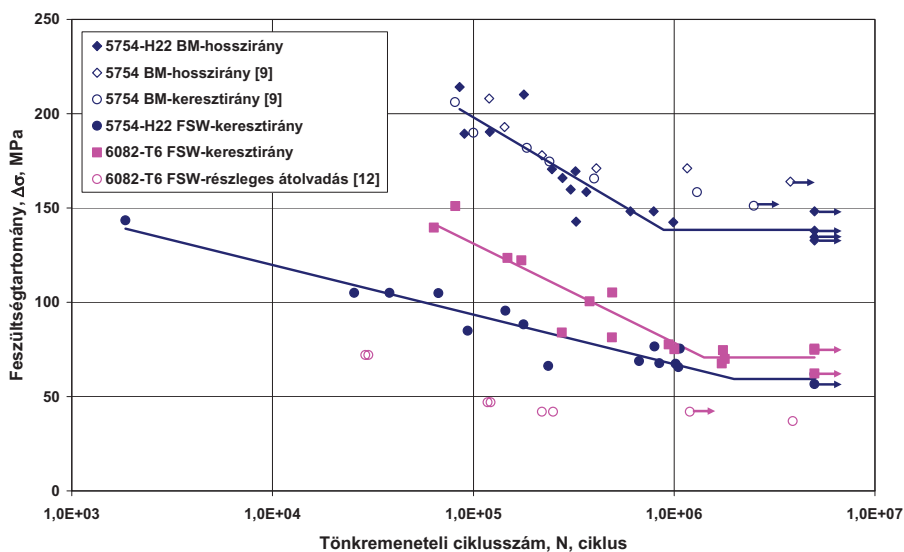
irányokat. Az FSW kötéseken ezeknél a vizsgálatoknál sem végeztünk sem utó-hőkezelést, sem forgácsolást. A vizsgálatokra ugyanazon körülmények között és berendezésen került sor, mint a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok esetében. A terhelési frekvencia a repedésterjedés első két harmadában $f = 20$ Hz, utolsó harmadában pedig $f = 5$ Hz volt, a terjedő repedés méretét compliance módszerrel határoztuk meg.



2. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz (FCG) alkalmazott próbatetek kialakítása.

3. A vizsgálatok eredményei

A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok során a töréshez tartozó ciklusszámokat rögzítettük. Az 5754-H22 anyagminőség FSW kötéseiben a törés a varratközépbén, míg a 6082-T6 anyagminőség kötéseiben a varratszélen következett be. Saját vizsgálatainkat a [13] közleményben bemutatott módszer szellemében értékeltük (Wöhler görbék meghatározása). A vizsgálati eredményeket és az összehasonlításra használt vizsgálatok eredményeit a 3. ábra foglalja össze.

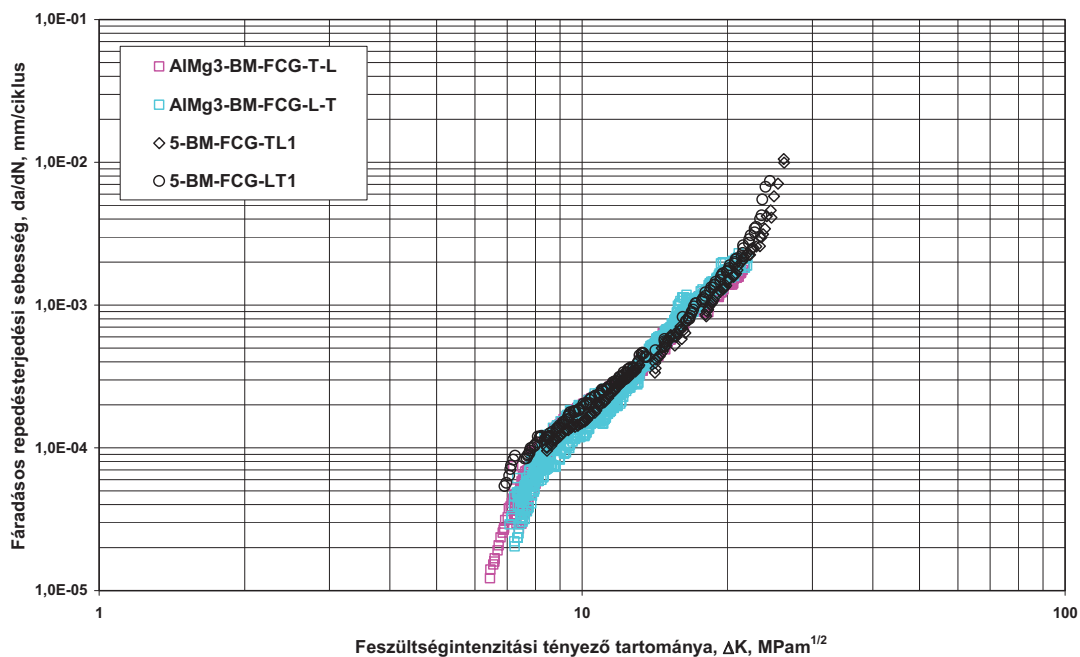


3. ábra. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei és a számított Wöhler görbék.

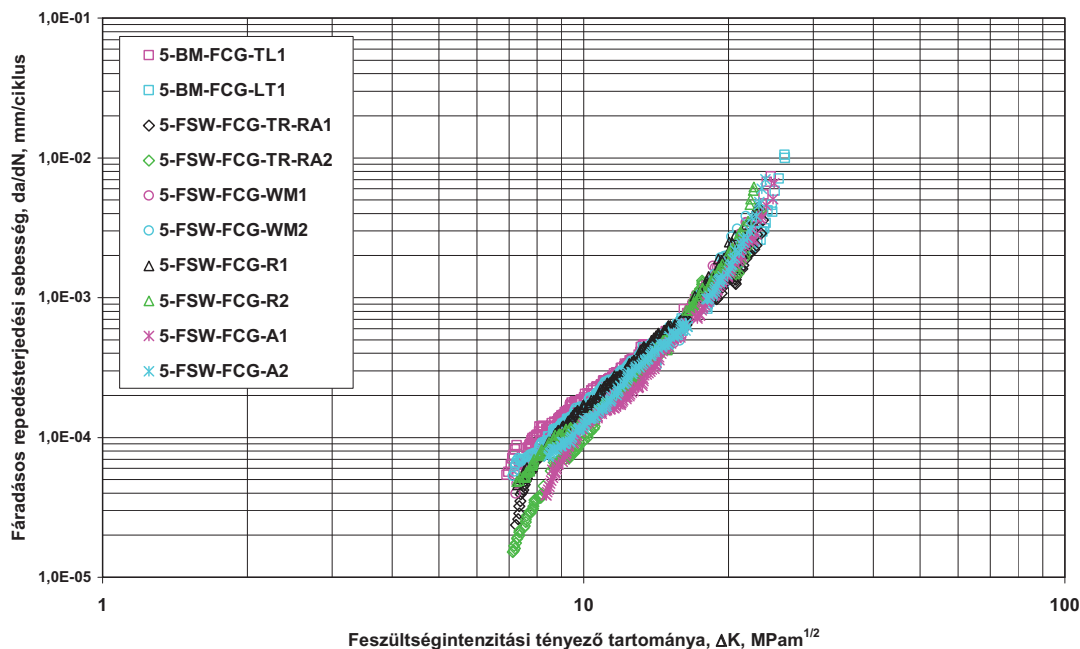
A fáradásos repedéssterjedési sebesség vizsgálatok értékeléséhez a hét ponton átmenő polinomos módszert [14] használtuk és meghatároztuk a Paris-Erdogan összefüggés állandóit (C és n) [15]. Az AlMg3 és az 5754-H22 alapanyagokon meghatározott kinetikai diagramokat, az orientációkat (T-L és L-T) is figyelembe véve, a 4. ábra szemlélteti. Az 5754-H22 anyag FSW kötéseiben meghatározott kinetikai diagramokat, a különböző

irányokban, illetve kötés részekben terjedő repedésekre, az 5. ábra mutatja be.

Az egyes kinetikai diagramokból meghatározott Paris-Erdogan állandókat az 5. táblázat foglalja össze. Azokban az esetekben, amikor a kinetikai diagram több egyenes szakasszal írható le az értelmezhető tartományokban, akkor az 5. táblázatban csak a diagram legnagyobb (középső) tartományát leíró összefüggés állandóit közöljük.



4. ábra. Az alapanyagokon (AlMg3, 5754-H22) elvégzett fáradásos repedéssterjedési sebesség vizsgálatok kinetikai diagramjai.



5. ábra. Az FSW kötésekben (5754-H22) kimunkált próbatesteken elvégzett fáradásos repedéssterjedési sebesség vizsgálatok kinetikai diagramjai.

A próbatest jele	C	n	r	A próbatest jele	C	n	r
AlMg3-BM-FCG-TL1	1,55E-07	3,06	0,994	5-BM-FCG-TL1	1,76E-07	3,04	0,996
AlMg3-BM-FCG-TL2	1,61E-07	3,03	0,993	5-BM-FCG-LT1	1,10E-07	3,15	0,996
AlMg3-BM-FCG-TL3	1,52E-07	3,05	0,993	5-FSW-FCG-TR-RA1	1,00E-07	3,16	0,997
AlMg3-BM-FCG-TL4	1,06E-07	3,20	0,993	5-FSW-FCG-TR-RA2	1,12E-07	3,97	0,995
AlMg3-BM-FCG-TL5	1,62E-07	3,03	0,993	5-FSW-FCG-WM1	1,49E-07	3,00	0,995
AlMg3-BM-FCG-LT1	7,08E-08	3,32	0,997	5-FSW-FCG-WM2	1,19E-07	3,15	0,997
AlMg3-BM-FCG-LT2	1,78E-08	3,84	0,996	5-FSW-FCG-R1	5,00E-08	3,50	0,997
AlMg3-BM-FCG-LT3	1,07E-07	3,22	0,993	5-FSW-FCG-R2	4,69E-08	3,47	0,993
AlMg3-BM-FCG-LT4	1,11E-07	3,21	0,988	5-FSW-FCG-A1	1,61E-08	3,80	0,993
AlMg3-BM-FCG-LT5	7,69E-08	3,34	0,996	5-FSW-FCG-A2	3,98E-08	3,50	0,998

5. táblázat. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokból meghatározott Paris-Erdogan állandók (C és n, MPam^{1/2}-mm/ciklus) és a korrelációs indexek (r).

ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett vizsgálatok és azok eredményei alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- A vizsgálati eredmények megbízható (lásd a korrelációs együtthatókat is) és reprodukálható vizsgálatokra utalnak.
- Az FSW kötésekben elvégzett nagyciklusú fáradásvizsgálatok eredményei igazolják a hegesztéstechnológia alkalmazhatóságát. Az a tény, hogy az 5754-H22 anyag FSW hegesztett kötéseinek nagyciklusú fáradással szembeni ellenállása alig fele az alapanyagénak, felveti a hegesztéstechnológia további finomításának lehetőségét, illetve igényét.
- A két, lényegében azonos, alapanyagon (AlMg3 és 5754-H22) elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei orientációnként (T-L és L-T) azonosnak tekinthetők. A mérhető (s = 12 mm és s = 6 mm) szignifikánsan nem mutatható ki. Mindezek lehetővé teszik az eredmények általánosabb alkalmazhatóságát.
- Az 5754-H22 anyag FSW kötéseiben a repedések terjedése szignifikánsan eltérőnek tekinthető, attól függően, hogy azok a kötés közepén, a kötés szélein vagy a kötés hossz tengelyére merőlegesen haladnak.
- Saját vizsgálataink eredményei jó összhangban vannak az összehasonlításra használt anyagminőségeken, illetve hegesztett kötésekben kapott eredményekkel.
- Statisztikailag megalapozottabb következtetések megfogalmazása további vizsgálatokat igényel.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

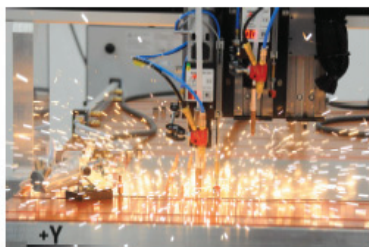
A cikkben ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge: Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering*, A280 (2000) pp. 37–49.
- [2] P. Tindall: Aluminium in bridges. *ICE Manual of Bridge Engineering*. Institution of Civil Engineers, 2008. pp. 345-355. doi: 10.1680/mobe.34525.0345.
- [3] C. B. Fuller, A. Krause, D. C. Dunand, D. N. Seidman: Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminum alloy modified by Sc and Zr additions. *Materials Science and Engineering*, A338 (2002) pp. 8-16.
- [4] Friction Stir Welding. <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/>
- [5] R. S. Mishra, Z. Y. Ma: Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*, R 50 (2005) pp. 1–78.
- [6] A. Kostirvas, J. C. Lippold: Weldability of Li-bearing aluminium alloys. *International Materials Reviews*, Vol. 44, No. 6 (1999) pp. 217-237.
- [7] Z. Barlas, U. Ozsarac: Effects of FSW Parameters on Joint Properties of AlMg3 Alloy. *Welding Journal*, Vol. 91, January (2012) pp. 16-s-22-s.
- [8] M. Vural, A. Ogur, G. Cam, C. Ozarpa: On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-0 and EN AW 5754-H22. *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 28, Issue 1, January (2007) pp. 49-54.
- [9] J. Li: The effect of microstructure and texture on high cycle fatigue properties of Al alloys (2007). University of Kentucky Doctoral Dissertations. Paper 522. http://uknowledge.uky.edu/gradschool_diss/522

- [10] P. M. G. P. Moreira, A. M. P. Jesus, A. S. Ribeiro, P. M. S. T. Castro: Fatigue Crack Growth Behaviour of the Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminium Alloy. *Mecânica Experimental*, Vol 16 (2008) pp. 99-106.
- [11] J. Adamowski, C. Gambaro, E. Lertora, M. Ponte, M. Szkodo: Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6. *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 28, Issue 8, August (2007) pp. 453-460.
- [12] M. Ericsson: Fatigue strength of friction stir welded joints in aluminium. Doctoral Thesis. Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm (2005). ISBN 91-7178-001-7, ISRN KTH/MSE—05/07—SE+MAT/AVH.
- [13] H. Nakazawa, S. Kodama: Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves. *Statistical Research on Fatigue and Fracture*. Eds.: T. Tanaka, S. Nishijima, M. Ichukawa. *Current Japanese Materials Research*, Vol. 2. Elsevier Applied Science, London-New York (1987) pp. 59-69.
- [14] ASTM E 647: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates (1988).
- [15] P. Paris, F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME (1963) pp. 528-534.

Cégünk új telephelyre költözött, ahol megújult környezetben, változatlanul magas színvonalú szolgáltatásokkal és magas minőségű SOYER termékekkel várjuk régi és új ügyfeleinket. Keressen fel minket és tudjon meg többet a csaphegesztés technológia páratlan előnyeiről.



Soyer Magyarország Kft.
Alba Ipari Zóna
8000 Székesfehérvár Babér u. 14.
Tel: 22/504-427
info@soyer.hu
www.soyer.hu



Az újonnan épült csarnokban, lehetőség nyílik telepített KTS-1550 CNC munkaállomáson történő, **dokumentált minőségű bémunka** végzésére. Kérje, személyre szabott ajánlatunkat.



A leggazdaságosabb megoldás az emberi hibák kizárására
Gyártást támogató LED Kijelző



BMS-9 csaphegesztő PS-9 hegesztőpisztoly
Az új fejlesztés lehetővé teszi, hogy a kezelő az üzemi állapotot, egy, a forgalmi lámpák elvén működő LED segítségével gyorsan felismerhesse.

A körívű LED kijelzőnek köszönhetően az üzemi állapot bármilyen szögből leolvasható. (Szabadalmi szám: DE 102010 001 629.2). A hagyományos csapartókkal ellentétben, az új típusú befogópatronnál nem szükséges a csapkilógást egyesével beállítani és a csapartót a különböző hosszúságú (6-40mm) csapokhoz igazítani. Így használatával nemcsak időt takarít meg, de egyben kizárja a csapartó rossz beállításából eredő hibákat.

Transzformátoros eljárás és inverter technológia



Az ívhúzásos csaphegesztés a maximális terheléshez való csaphegesztési eljárás. Ez az eljárás lehetővé teszi a 6-25mm átmérőjű hegesztőcsapok magas minőségű illesztését. Alkalmazhatóság: gépjármű építés, hajóépítés, acélipar, hidépítés. Az inverteres csaphegesztő berendezésekbe **integrált SRM technológia** segítségével lehetőség nyílik anyák, csövek, csavarok teljes keresztmetszetben történő felhegesztésére.

