

HEGESZTETT ALUMÍNIUM GERENDA FÁRADÁSA – KÍSÉRLETI ELEMZÉS

Vigh László Gergely *

RÖVID KIVONAT

Napjainkban szerte a világon nagy problémát jelent a hidak előregedése, azok gazdaságos felújítása. Hasonlóképpen, gazdaságos megoldást kell keresni az új hidak megépítésekor is. A Japan Aluminum Association (JAA) és az Osaka University közös programjának keretében került kifejlesztésre egy alumínium hídpályalemez, amely elonyei miatt megoldást jelenthet az elozoekben felsoroltakra, sőt: új megvilágításba helyezi az eddigieknél nagyobb fesztávú hídépítési törekvéseket is [3], [5].

Természetesen a pályalemezrendszer alkalmazásának korlátot szab annak fáradási teherbírása. A cikk célja ezen hídpályalemez viselkedésének elemzése a híd tengelyére meroleges irányában. Az ortotróp pályalemez alumínium extrudált profilokból áll, azokat egy újonnan kifejlesztett, ún. Friction Stir Welding (FSW) eljárással kapcsolják egymáshoz [4]. A célként megfogalmazott elemzésekhez egy keresztirányban kivágott gerendaszeleten végeztem fárasztó kísérleteket a teljes kutatási program rám kiszabott feladataként.

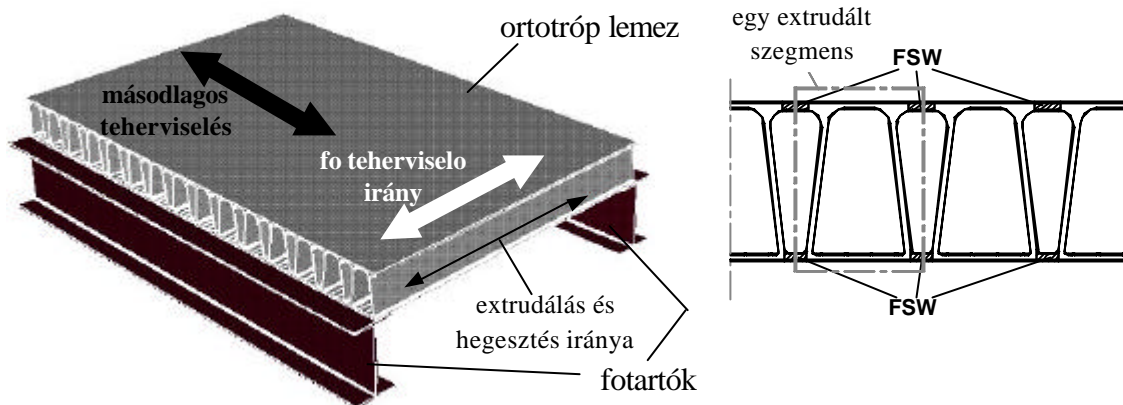
A keresztirányú fáradási teherbírás jelentos tényező lehet a tervezésben is, minthogy bizonyos geometriai méretek mellett ezen tönkremenetel a mértékadó. A cikk számszerűsíti a fáradási teherbírást, adatokat szolgáltatva a későbbi tervezéshez. Emellett a tönkremenetel módját, a törés terjedésének sajátosságait is taglalja, amelyek szoros kapcsolatban állnak a teherbírás mértékével.

Mindezek alapján a pályalemez gyakorlati alkalmazhatósága, annak esetleges korlátai kiértékelésre kerülnek. A jelentkező problémák okainak áthidalását, illetve a fáradási szilárdság növelésének lehetőségeit is elemzi a cikk.

1. BEVEZETÉS

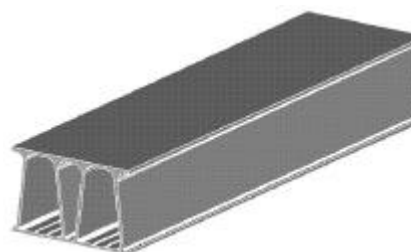
A kifejlesztett pályalemez rendszerét mutatja az 1. ábra. Az egyes – Al-Mg-Si ötvözetű (A6N01S-T5 jelű, lásd [2]) – extrudált gerendákat az ún. *Friction Stir Welding* (FSW) [4] eljárással kapcsolják egymáshoz. Ez az újonnan kidolgozott hegesztési eljárás a hozzá fűzött remények szerint megoldja az alumínium hegeszthetőségének problémáját, hiszen az anyag képlékenyítése annak olvadáspontja alatt, súrlódási hőenergia segítségével történik, amely egyrészt olcsóbbá teszi a hegesztést, másrészt az anyagjellemzők kisebb mértékű romlását eredményezi [1].

* okl. építőmérnök, doktorandusz, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke



1. ábra: A JAA által kidolgozott pályalemez elvi sémája [3]

A pályalemez fáradási viselkedését magán a pályalemezen végzett kísérletekkel, illetve a két fő irányra szétbontva vizsgáltuk [3], [5]. Kisebb fotartó-távolság esetén a felső öv lokális hajlítása lehet mértékadó, keresztirányú fáradt repedést eloidézva. A távolság növelésével a globális keresztirányú nyomtérk által az alsó övben, a hídteigely irányában okozott fáradt repedés lesz a mértékadó. Ez a két jelenség a pályalemezből kivágott gerendák fáradási viselkedésével jellemezhető. Jelen cikk a globális nyomtérkből adódó alsó övi repedésre koncentrált, amelyet a 2. ábrán bemutatott jellegű próbatesteken végzett vizsgálatokkal elemeztünk.



2. ábra: Gerenda-próbatest

1. táblázat: Anyagjellemzők reprezentatív értékei [7]

	E [MPa]	n [-]	G [MPa]	f_{0.2} [MPa]	f_u [MPa]	e_u [%]
alap-anyag	70289.557	0.311	26797.902	245.141	268.643	7.950
FSW trans.	69042.023	0.324	26080.494	112.369	220.560	-
FSW long.	67297.155	0.330	25298.414	126.975	218.305	30.503

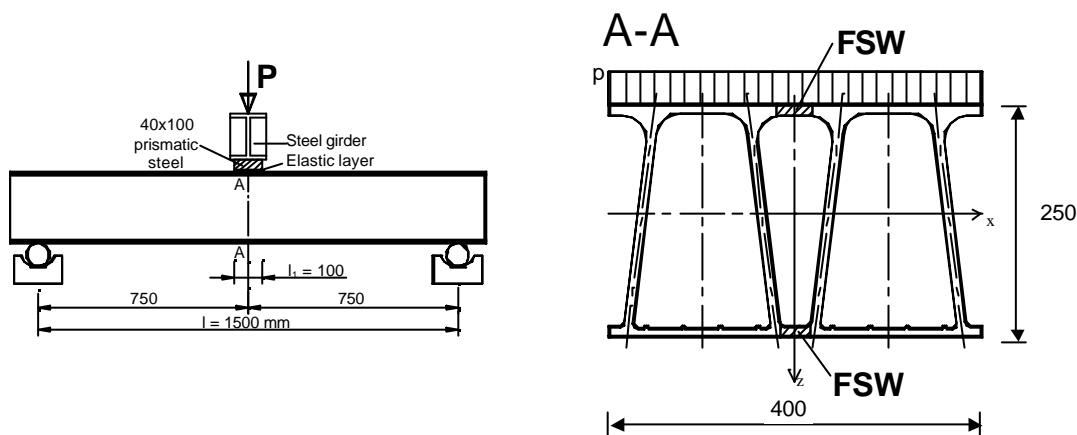
E – rugalmassági modulus, ν – Poisson-tényező, G – nyírási modulus, f_{prop} – arányossági határ, $f_{0.2}$ – egyezményes folyási határ, f_u – szakítószilárdság, ϵ_u – szakadási nyúlás

Minthogy az FSW teljesen új technológia és az alapanyagra gyakorolt hatása nem ismert még pontosan, szakítópróbákat hajtottunk végre, melynek eredményei láthatók az 1. táblázatban [7]. Lényeges különbség látható az egyezményes folyáshatár (hegesztett anyag kilágul), illetve a szakadási nyúlást illetően (duktilisabb), azonban az

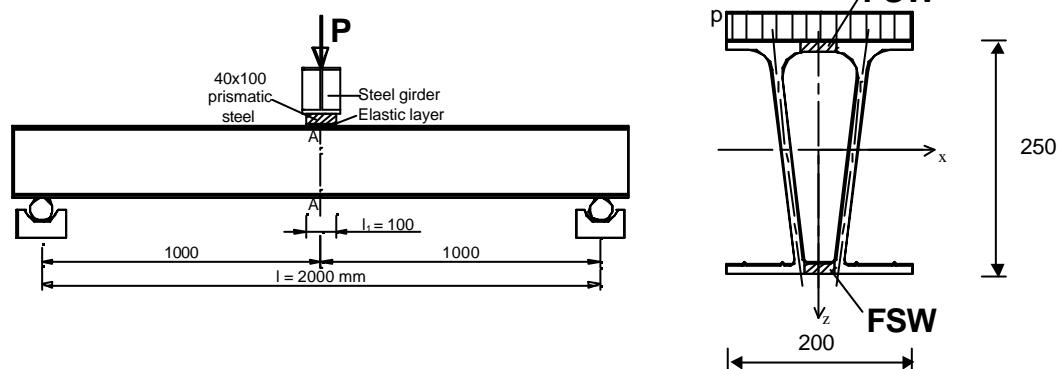
FSW szakítószilárdság már csak 18%-kal kisebb az alapanyagénál. Megjegyzendő még, hogy az átmeneti zóna a varratengelytől mérve csak 20-20 mm-es kiterjedésű, míg hagyományos hegesztéseknél ez 25-25 mm („one-inch rule”).

2. KÍSÉRLETI PROGRAM

A kísérletsorozatban technikai okok miatt kétféle gerenda került felhasználásra (3. ábra): ún. „dupla”, illetve „szimpla” gerenda. Azonban, mint látható, a kétféle gerenda közti különbségnek nincs hatása a fáradás szempontjából, hiszen mindkét esetben a szimmetriatengelyben elhelyezkedő, ugyanolyan kiterjedésű átmeneti zónával rendelkezik a gerenda. A 2. táblázat az egyes kísérletek, próbatestek adatait mutatja be. A táblázat egyben tartalmazza a középso keresztmetszet alsó övének számított alakváltozásait is (ahol a repedés megindulása feltételezett). Gondolva a leendő szerkezeti kialakításra (keresztben kéttámaszú lemez), illetve a kísérlet könnyebb kivitelezhetősége miatt a maximális és minimális feszültség arányát 0,1-ben határoztuk meg.



a) „dupla” gerenda



b) „szimpla” gerenda

3. ábra: A próbatestek és a kísérletek kialakítása

2. táblázat: Kísérleti program

Nr.	Geometriai jellemzők			Tehertartomány			Nyom. tart.	Fesz. tart.	Alakv. tart.	Megj.
	l	l ₁	W _{x,el,2}	P _{min}	P _{max}	DP	ΔM	D _S	D _e	
	m	m	mm ³	tf (kN)			kNm	MPa	με	
1	1,5	0,1	1309505,37	5,0 (49,0)	50,0 (490,3)	45,0 (441,3)	159,97	122,161	1763	dupla
2	2,0	0,1	654752,68	2,5 (24,5)	25,0 (245,2)	22,5 (220,6)	107,57	164,286	2371	szimpla
3	2,0	0,1	654752,68	2,2 (21,6)	22,0 (215,7)	19,8 (194,2)	94,66	144,572	2086	szimpla
4	2,0	0,1	654752,68	1,4 (13,7)	14,0 (137,3)	12,6 (123,6)	60,24	92,000	1328	szimpla
5	2,0	0,1	654752,68	1,1 (10,8)	11,0 (107,9)	9,9 (97,1)	47,33	72,286	1043	szimpla

3. A KERESZTIRÁNYÚ GERENDA FÁRADÁSA

3.1. Fáradási görbe és jellemzők

A 4. ábra kettős logaritmusos léptékben mutatja a kísérletből kapott fáradási S-N (feszültség - ciklusszám) összefüggést, összehasonlítva egy korábbi, az alapanyagra vonatkozó mérésrel, illetve a vonatkozó *EUROCODE 9* előírásokkal [6].

Az *S-N görbe* ekkor a

$$\log(N_f) = 11,739 - 2,973 \cdot \log(\Delta\sigma)$$

összefüggéssel jellemezhető, ahol N_f a $\Delta\sigma$ feszültségkülönbséghez tartozó tönkremeneteli ciklusszám. A mérési eredmények standard szórása 0,1108. A *fáradási szilárdság* 71,996 MPa, amely azonban egyelőre csak egy mérésen alapszik.

3. táblázat: A fáradási görbék fontosabb jellemzői

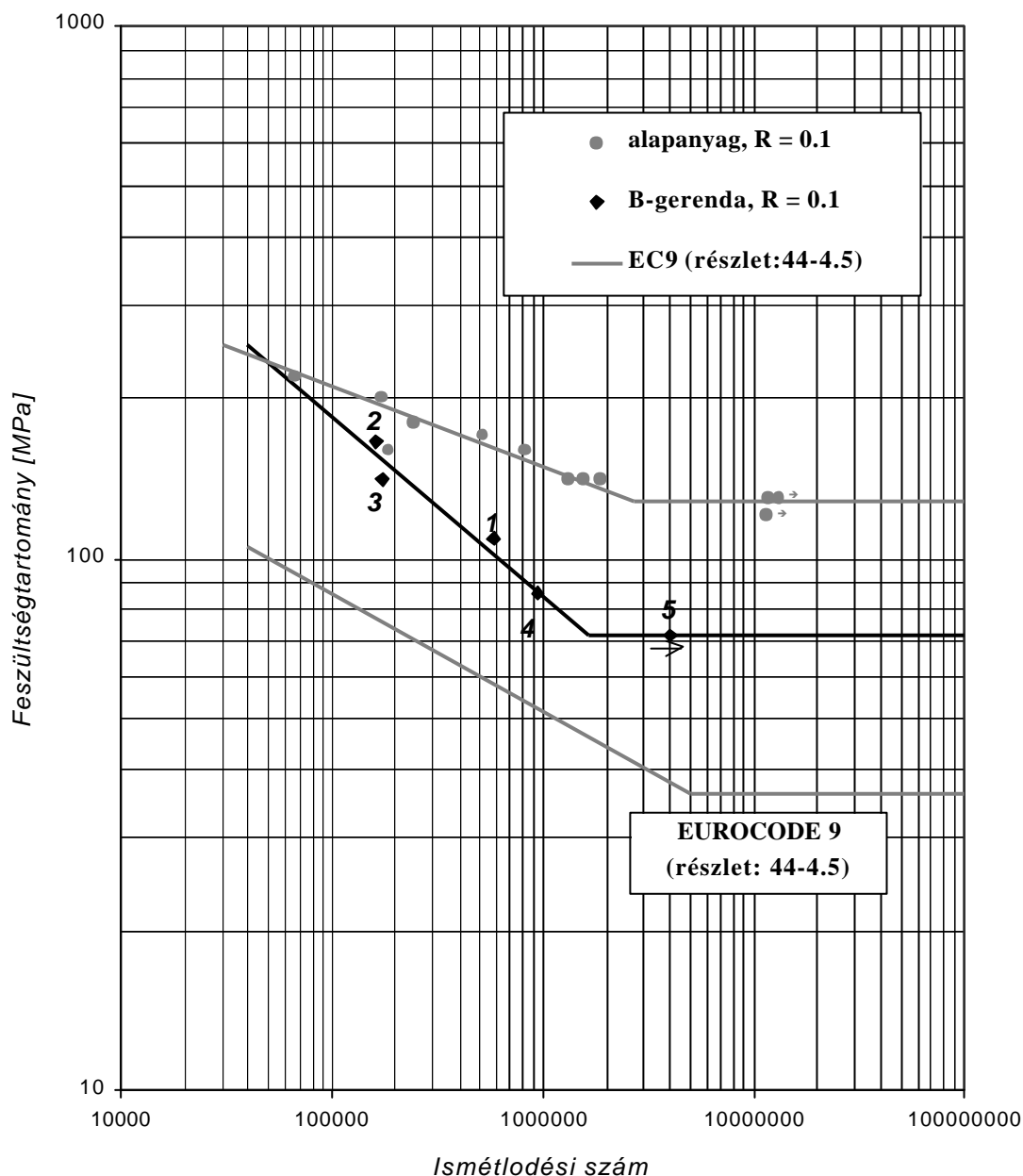
R [-]	Próbatest jellege	$\log c$	m	x_N	R_K [MPa]
-1	alapanyag	23,9	7,7	0,0733	160
0,1	alapanyag	20,3	6,6	0,2140	130
	gerenda	11,7	3,0	0,1108	72

R – feszültségarány, $\log c$, m – a logaritmusos S-N görbe vízszintes tengellyel való metszéke, illetve a görbe meredeksége, x_N – a mérési eredmények standard szórása, R_K – fáradási szilárdság

A kapott görbét az alapanyagon végzett mérési eredményekkel összehasonlítva ([5], illetve 4. ábra és 3. táblázat) láthatjuk, hogy az FSW csökkent a fáradási szilárdságot, illetve a levágási határt. Megjegyzendő, hogy a gerendához tartozó S-N görbe meredeksége kb. 3, amely a *MIG* hegesztés alkalmazásakor jellemző érték.

A fáradási jellemzők az FSW technológiájának módosításával, továbbá a hegesztés által befolyásolt zónák anyagjellemzőinek befolyásolásával javíthatóak (lásd [1] és [4]).

Mindezek ellenére, mint az ábra mutatja, a fáradási görbe még így is magasan az *EUROCODE 9* szerinti, a hosszirányú 44-4.5 tompavarrathoz tartozó minimális görbe felett helyezkedik el [6], amely azt engedi sejtetni, hogy az FSW az építőmérnöki gyakorlatban alkalmazható, annak ellenére, hogy jelen elemzésben nem vettük figyelembe a biztonsági tényezőket.

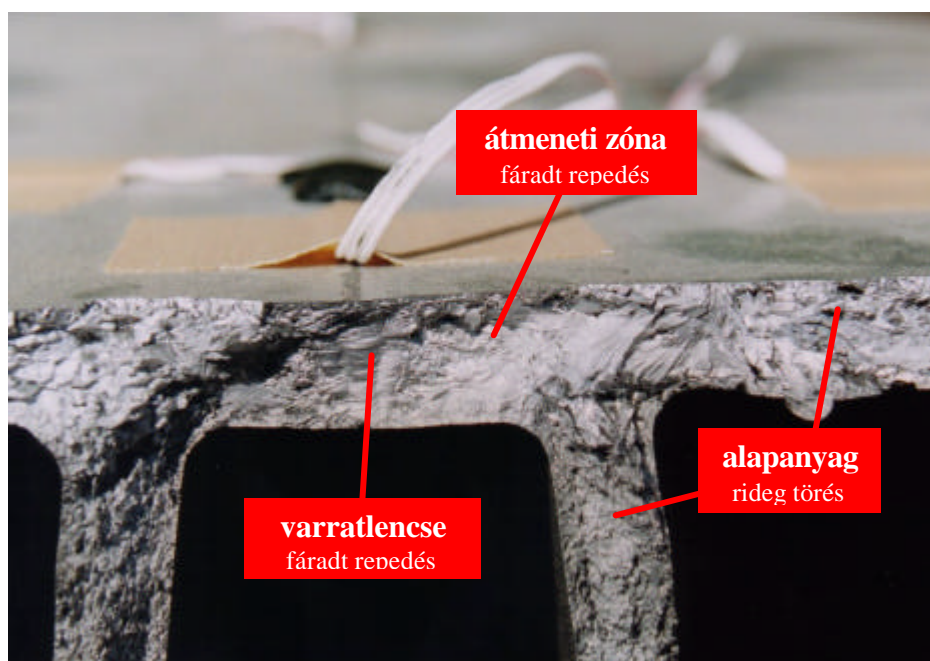


4. ábra: Kísérleti S-N görbe

Megjegyzendő még, hogy az egyes kísérletek között is tapasztalható különbség. Míg az 1. és 2. kísérletnél a repedés a gerenda feszítójának szinte pontosan a felében indult meg, addig a 3-4. esetben attól relatíve távol, egy lokális felületi hibából, amely bizonyosan az FSW technológiai beállításának következménye. Ezen hiba kiküszöbölésével a fáradási viselkedés tovább javítható.

3.2. Repedésterjedés

A repedés érthető módon mindig az FSW zónából indult ki, annak kisebb szilárdsága és az FSW technológia által okozott maradó feszültségek miatt [5], [7].



5. ábra: A töréskép

A repedésterjedésre vonatkozóan a kísérlet során tapasztaltakkal egyező megállapításokat lehet tenni a töréskép elemzése alapján (5. ábra). A szemcseméret a varratlencsében a legfinomabb, majd valamelyest durvább az átmeneti zónákban, és a legdurvább az alapanyagban. Eszerint a varratlencsében és az átmeneti zónákban lassú, fáradt repedés alakult ki, míg – ahogy azt a törési felület 45° -os szöge is bizonyítja – az alapanyagba érve rideg töréssel ment tönkre a gerenda. Ez érthető, hiszen az alapanyag lényegesen kisebb duktilitású, mint az FSW zóna (8% a 30%-kal szemben). Emellett az FSW zónában az is csökkenti a repedésterjedés sebességét, hogy ott a maradó feszültségek elérik annak folyáshatárát. A jelenség veszélye, hogy az FSW a keresztmetszetben viszonylag kis területet foglal el, így a hirtelen tönkremenetelt nem jelzik előre nagy lehajlások. A probléma megoldására több elképzelés is született, pl. az FSW anyagjellemzőinek vagy technológiájának javítása [1] és [4], alapanyag javítása, retardáció alkalmazása az alapanyagban vagy egy monitoring rendszerben indikátorok alkalmazása [8].

4. KONKLÚZIÓK

Ezen kísérletsorozat alapján a következőket lehet megállapítani:

- A 0,1-es feszültségáramhoz tartozó fáradási görbét előállítottuk, bár további kísérleteket kell még végrehajtani.
- A levágási határt meghatároztuk; azt további kísérletekkel ellenőrizni kell.
- Megállapítást nyert, hogy az FSW technológia nagy mértékben befolyásolja a fáradási viselkedést: a repedés ott indul meg, illetve az alapanyaghoz képest lecsökkent fáradási szilárdságot eredményez.
- Szintén az FSW által okozott geometriai diszkontinuitások még tovább rontják a fáradási jellemzőket. Ezeket kiküszöbölve jobb fáradási viselkedés lenne elérhető, mint a hagyományos hegesztési eljárásokkal.
- A kezdetben lassú fáradt repedés az alapanyagba érve hirtelen felgyorsul, az alapanyag rideg törés formájában megy tönkre. Ezen jelenség elkerülése elsődleges szempont lehet, hiszen a hirtelen tönkremenetelt nem jelzik nagy lehajlások az FSW zónák kis kiterjedése miatt.
- Mindazonáltal az EUROCODE 9 előírásaival való összehasonlítás alapján – a biztonsági tényezők elhanyagolása ellenére – kijelenthető, hogy az FSW az építőmérnöki gyakorlatban alkalmazható, bár a fentiek alapján törekedni kell a fáradási jellemzők javítására.
- A kísérletsorozat konfigurációja megfelel azon követelményeknek, amelyeket az eredmények gyakorlati felhasználásával szemben támasztunk (valós méretek, stb.).
- Tovább lépésként a fentiek alapján további kísérleteket kell végrehajtani a fáradási görbe és a levágási határ pontosításához. A hirtelen tönkremenetel megelőzésére irányuló lehetséges megoldásokat is elemezni kell.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönettel tartozik *dr. Ichiro Okurának* (Osaka University), aki a kutatás vezetőjeként irányította ezt munkájában. Köszönet *dr. Dunai Lászlónak* (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) témavezetői támogatásáért.

Külön köszönet *Makoto Naruo* és *Taiki Nakahara* hallgatónak, illetve *Rokuro Nishiyama* technikusnak (Osaka University), akik a kísérletek kivitelezésében segédkeztek.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Nicholas, E. D.: Developments in the friction stir welding of metals, *Proceedings of ICAA-6*, Aluminum alloys, Vol. 1, TWI, Cambridge, 1998
- [2] *JIS H0001:1998*: Aluminium, magnesium and their alloys – Temper designation, Japanese Industrial Standard, 1998

- [3] Okura, I.: Prospect of Application of Aluminum to Bridges, *Japanese Society of Light Metal, 59th symposium*, pp.19...31, 2000
- [4] Kallee, S. – Nicholas, E. D.: Friction Stir Welding, *TWI homepage* (<http://www.twi.co.uk>), 1999
- [5] *Report on Database for Aluminium Slabs*, Japan Aluminium Association, Japan, March 2000
- [6] prENV 1999-2:1997 Eurocode 9: *Design of Aluminium Structures, Part 2: Structures Susceptible to Fatigue*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 1997
- [7] Okura, I. – Naruo, M. – Vigh, L. G. – Hagnosisawa, N. – Toda, H.: Mechanical and Structural Properties of Aluminum Decks Fabricated by Friction Stir Welding, *JECE, Proceedings of the 2nd Symposium on Decks of Highway Bridges*, pp.131...136, 2000
- [8] Dürr, W.: Life Cycle Monitoring of the Dornier Foldable Bridge System, *INALCO, Proceedings for the 8th International Conference on Aluminium Joints*, pp. 94-1...13, Munich, March 2001