

# INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM GTA WELD METAL

## UTICAJ VELIČINE ZRNA NA MEHANIČKE OSOBINE METALA ŠAVA ALUMINIJUMA ZAVAREN OG TIG POSTUPKOM

NASTAVAK IZ PREDHODNOG BROJA

CONTINUED FROM PREVIOUS ISSUE

2. deo

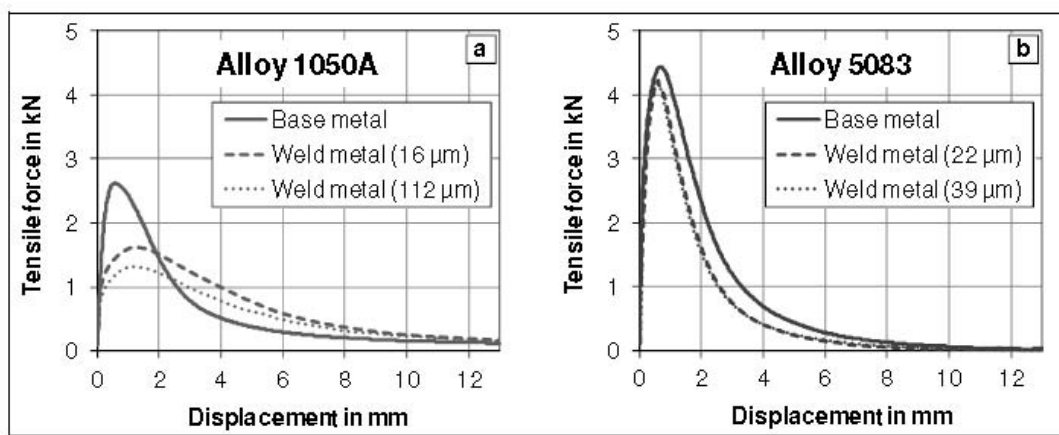
part 2

### 3.4 Žilavost

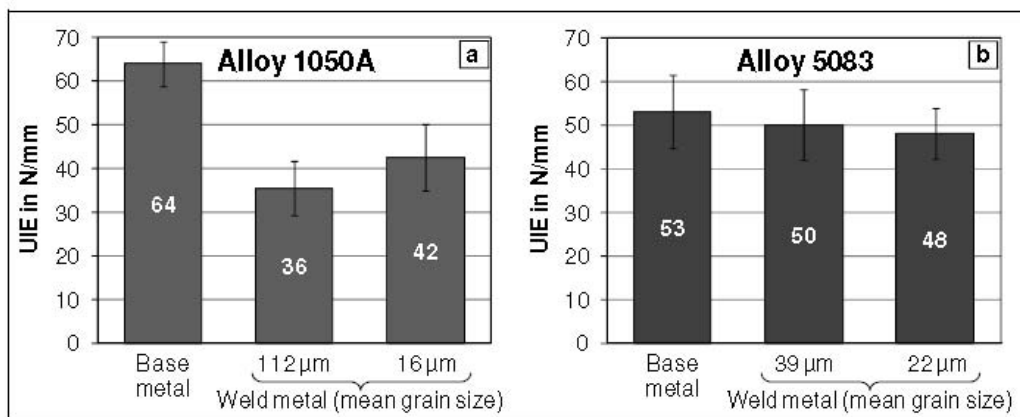
Žilavost osnovnog materijala i metala šava legura 1050A i 5083 određena je pri ispitivanju cepanjem. Slika 6 pokazuje dobijene krive sila-pomeranje, gde je svaka kriva, srednja vrednost 6 različitih ispitivanja cepanjem. Kao što se očekivalo, maksimalna opterećenja su bila niža kod epruveta od legure 1050A (slika 6a) nego kod legure 5083 (slika 6b) s obzirom na nižu čvrstoću legure 1050A u poređenju sa legurom 5083.

Štaviše, razlika u žilavosti između osnovnog materijala i metala šava je veća za leguru 1050A i manja za leguru 5083. Iz svake krive sila-pomeranje, jedinice energije UIE i UPE su računane prema jednačinama (2) i (3). Srednja vrednost energije potrebne za nastanak prsline (UIE) prikazana je na slici 7. UIE je mera za zareznu žilavost [19]. U saglasnosti sa slikom 6, UIE za leguru 1050A je mnogo veća za osnovni materijal nego za metal šava, videti sliku 7a. Ovo je verovatno zbog potpunog gubitka efekata obrade na hladno i stoga čvrstoće tokom TIG zavarivanja što je takođe saopšteno pri merenju tvrdoće i ispitivanju zatezanjem za leguru 1050A, poziv na

delove 3.2 i 3.3. Rezultujuće smanjenje UIE od osnovnog materijala ka metalu šava bio je samo blago izražen kod legure 5083, videti sliku 7b. Ovo se može objasniti vrlo malim stepenom obrade na hladno osnovnog materijala lima 5083 (manje od 1/4 tvrd) u poređenju sa hladno obrađenim osnovnim materijalom 1050A (1/2 tvrd). U odnosu na osnovni materijal, legura 1050A pokazuje veću otpornost na nastanak prsline (64 N/mm) nego legura 5083 (53 N/mm), što se ne reflektuje na različite čvrstoće obe legure (legura 1050A: 108 MPa, legura 5083: 143 MPa). Štaviše, rafinacija zrna znatno povećava vrednosti UIE metala šava za leguru 1050A, dok je taj efekat zanemarljiv za leguru 5083. Da bi se ovo objasnilo, mora se pozvati na to da je smanjenje srednje vrednosti veličine zrna bilo više izraženo u metalu šava od 1050A (-86%) nego u metalu šava od 5083 (-44%), poziv na sliku 3. Prečnik zreza kao značajan uticajni faktor vezan za nastanak prsline, meren je na svakoj epruveti pre ispitivanja i njegove vrednosti su bile u intervalu 0.05 i 0.15 mm za sve epruvete od obe legure. Sistemski uticaj prečnika zreza na UIE, međutim, nije nađen.



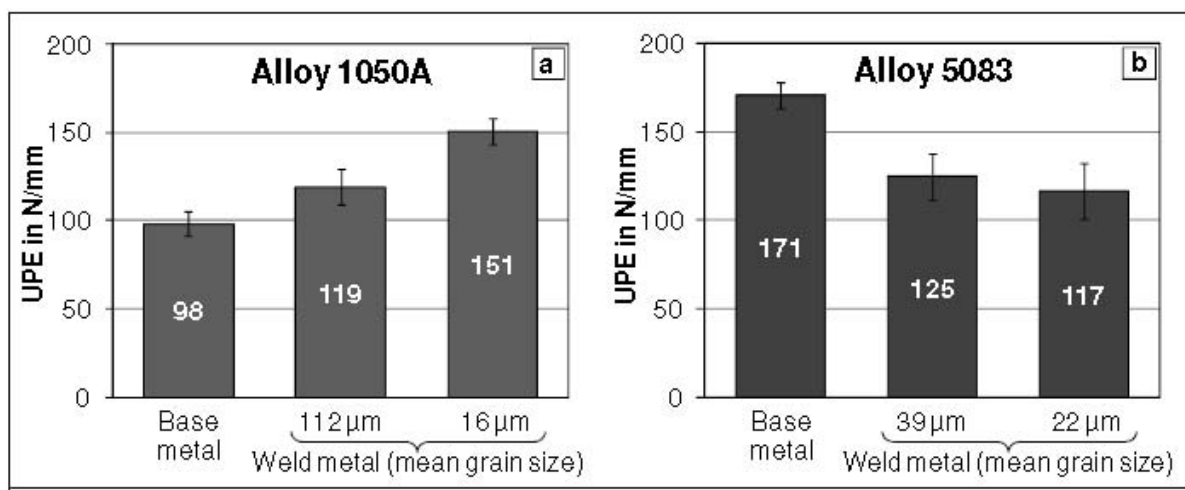
**Slika 6.** Sila zatezanja zavisno od pomeranja i veličine zrna pri ispitivanju cepanjem (srednja vrednost). TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm



**Slika 7.** Jedinica energije za nastanak (*UIE*) zavisno od veličine zrna pri ispitivanju cepanjem. TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm

Jedinica energije potrebna za naknadno širenje prsline do loma (*UPE*) predstavlja otpornost cepanju materijala [19] i takođe se shvata kao mera udarne žilavosti [44, 54]. Slika 8 pokazuje dobijene vrednosti *UPE* koje potvrđuju potpuno različito prostiranje prsline u ove dve legure: otpornost na širenje prsline je mnogo veća u osnovnom materijalu od 5083 (171 N/mm) nego u osnovnom materijalu od 1050A (98 N/mm). Ovakvo ponašanje je razumljivo jer su granica otpornosti i zatezna čvrstoća legure 5083 generalno viših vrednosti nego kod legure 1050A, poziv na deo 3.3. Štaviše, vrednosti *UPE* (slika 8) su jasno više nego odgovarajuće vrednosti *UIE* (slika 7), što je uobičajeno za slučaj legura Al [19, 44, 55]. Visoka žilavost legure 5083, međutim, opada ako se prsline prostire kroz metal šava, videti sliku 8b. Tada je *UPE* legure 5083 slična (grubozrni metal

šava) ili izraženo manja (finozrni metal šava) u odnosu na odgovarajuće vrednosti *UPE* za leguru 1050A. Unapređenje otpornosti na širenje prsline preko rafinacije zrna je vrlo jasno za leguru 1050A (27%) dok metal šava od 5083 beleži blago smanjenje žilavosti (- 6%) preko rafinacije zrna. Tako, slika 8 pokazuje da je ojačavanje preko veličine zrna najznačajniji mehanizam ojačavanja za leguru 1050A dok je za leguru 5083, ovaj mehanizam zanemarljiv u odnosu na ojačavanje čvrstim rastvorom sa Mg. Ovo se tvrdi i na drugim mestima [18] rafinacija zrna može da smanji udarnu žilavost u nekim slučajevima dok fina zrna smanjuju vijugavost prsline i čak energiju potrebnu za širenje prsline. Bez obzira na to, fina zrna često daju veću žilavost [19], kao što je prikazano u npr. studiji o Al livenim legurama –legura Al Si7Mg [54].



**Slika 8.** Jedinica energije za širenje (*UPE*) zavisno od veličine zrna pri ispitivanju cepanjem. TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm

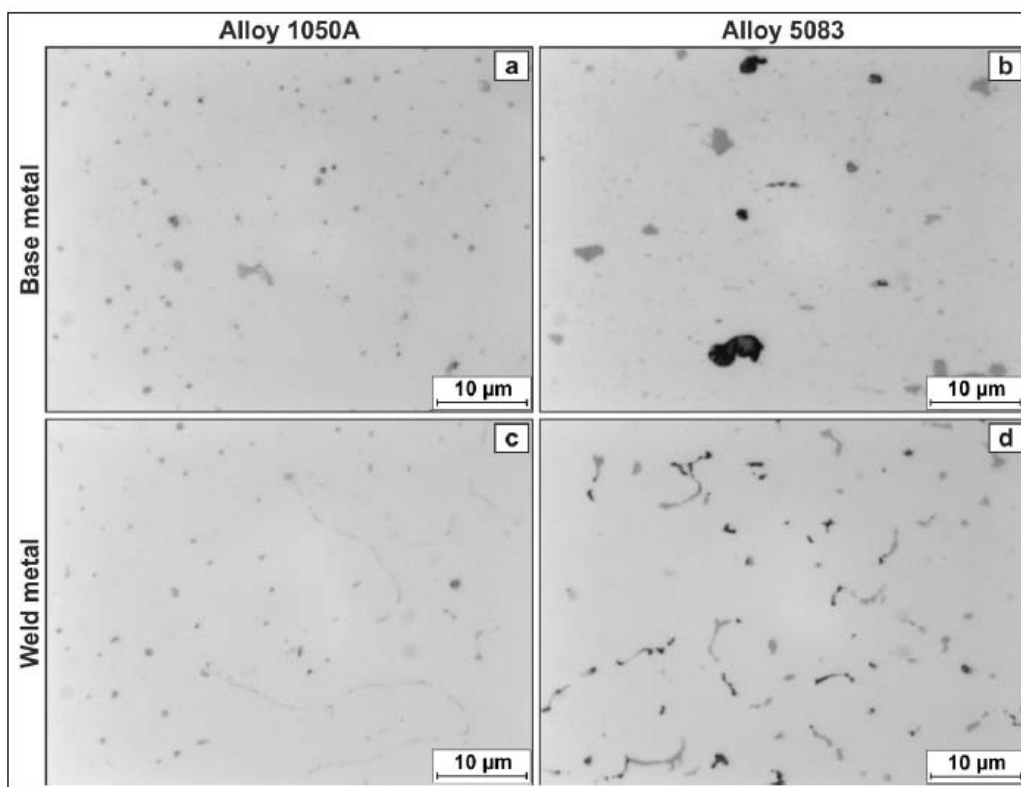
Važno je napomenuti da pomeranje u momentu nastajanja prsline (*si*, poziv na sliku 2) ima veliki uticaj na vrednosti *UIE* i *UPE*: određivanje *si* prema standardu [43] pretpostavlja da prsline nastaje generalno pri najvećem opterećenju, što nije slučaj

u ovoj studiji, posebno kod legure 1050A. Poređenjem obe metode izračunavanja, razlika izračunatih *UIE* i *UPE* može da bude do 64%. Ovo naglašava potrebu za određivanjem stvarne vrednosti *si* kao što je pokazano u ovoj studiji, što

je takođe urađeno i na drugim mestima [44]. Prslina se širi upravno na pravac opterećenja – unutar odstupanja od  $\pm 20^\circ$ , mnogo češće i unutar  $\pm 10^\circ$  (odvojeno od dve epruvete kod legure 5083). Nije primećeno izvijanje i na zavarenim epruvetama prslina nije izašla iz metala šava. Epruvete su izrađene od legure 1050A koja je bila više plastično deformisana nego legura 5083, što odgovara razlikama koje se odnose na *UIE* i *UPE* između obe legure, poziv na slike 7 i 8. Udarne žilavost se može smanjiti preko rafinacije zrna ako se lom menja od transgranularnog na intergranularni [15]. Metalografija i SEM analiza, međutim, potvrđuju to da je prostiranje prsline bilo transgranularno na svim epruvetama u ovoj studiji. Ovo sugeriše da granice zrna verovatno igraju sporednu ulogu u otpornosti na širenje prslina. Umesto toga, smatra se da hemijski sastav i odgovarajuća mikrostruktura imaju glavnu ulogu različite žilavosti obe legure što se pominje i kod drugih [7, 17]. Može se videti sa slike 9 da su intermetalne faze velike i sferne u osnovnom materijalu (slika 9a i b) i tanke i dugačke u metalu šava stvarajući polukontinualnu mrežu (slika 9c i d). Rafinacija zrna u metalu šava polako povećava veličinu ovih faza. Slika 9 dalje pokazuje da je promena u mikrostrukturi od osnovnog materijala do metala šava bila više izražena kod legure 5083 nego kod legure 1050A zbog većeg stepena legiranosti legure 5083. Tako, mreža

intermetalnih faza obezbeđuje putanju za širenje prsline duž ovih faza, posebno u metalu šava legure 5083.

Pored veličine i raspodele, hemijski sastav intermetalnih faza je značajan za kontrolu variranja žilavosti. Na primer, veliki udeo elemenata nečistoća kao što su Fe i Si može da obezbedi mesta za nastanak i širenje prslina u 2xxx i 7xxx legurama [17]. WDS analiza je pokazala za leguru 5083 da tamna (crna) faza na slici 9 b i d jeste  $Mg_2Si$  dok je svetla (siva) faza verovatno  $Al_6(FeMn)$  [7, 40],  $Al_7(FeMn)$  [56] ili  $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$  [7]. Veoma je poznato da  $Mg_2Si$  ima štetan efekat na otpornost prema lomu i duktilnost [57] (što takođe može da objasni veliku razliku u duktilnosti između osnovnog materijala i metala šava za leguru 5083, poziv na sliku 5). Ovo sugeriše da je žilavost metala šava od legure 5083 bila manja nego u osnovnom materijalu usled širenja prsline duž krtih intermetalnih faza sa nepovoljnom veličinom i raspodelom. Sivi eutektički konstituent u osnovnom materijalu i metalu šava od 1050A (slika 9 a i c) je verovatno  $Al_6Fe$  ili  $Al_8Fe_2Si$  [40]. Štaviše,  $Al_3Ti$  aglomerati koji se stvaraju pri većim nivoima dodatka rafinatora [49] mogu imati negativan uticaj na žilavost. U stvari,  $Al_3Ti$  je stvoren u obe legure; čak rezultuje u smanjenju žilavosti koje se može javiti u oba finozrna metala šava od 1050A i 5083, što nije bio slučaj u ovoj studiji.



**Slika 9.** Intermetalne faze u osnovnom materijalu (a i b) i nerafinisani metal šava (c i d). TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm

Parametar koji se obično određuje pri ispitivanju cepanjem je čvrstoća cepanja koja se izračunava prema standardu [43]:

$$\text{Tear Strength} = \frac{4F_i}{w \cdot t} \quad (4)$$

#### Tear strength – čvrstoća cepanja

gde je  $F_i$  sila zatezanja pri nastanku prsline (pri pomeranju  $s_i$ ),  $w$  je širina epruvete (25 mm, rastojanje između korenog zarezaja i zadnje strane epruvete) i  $t$  je

debljina epruvete (2 mm). U tabeli 4 su pobrojane očekivane vrednosti čvrstoće cepanja za osnovni materijal i metal šava sa grubozrnim i fino-zrnim strukturom. Ove vrednosti pokazuju isti trend kao i  $UIE$ , poziv na sliku 7; tako je čvrstoća cepanja mnogo veća kod legure 5083 nego kod legure 1050A. U dodatku, u tabeli 4 je zbirno data granica otpornosti  $Rp0.2$  za obe legure koje su prethodno predstavljene ispitivanjem zatezanjem (poziv na deo 3.3).

Parameter	1050A (Al 99.5)			5083 (Al Mg4.5Mn0.7)		
	BM	WM		BM	WM	
Mean grain size in $\mu\text{m}$	20	112	16	14	39	22
Tear strength in MPa	171	103	135	355	335	329
Proof strength in MPa	108	-	-	143	127	129
Tear strength / Proof strength	1.6	-	-	2.5	2.6	2.6

**Tabela 4.** Čvrstoća cepanja i čvrstoća otpornosti za osnovni materijal i metal šava zavisno od srednje vrednosti veličine zrna

(mean grain size-srednja vrednost veličine zrna; tear strength- čvrstoća cepanja; proof strength- čvrstoća otpornosti)

Koeficijent čvrstoće cepanja i granice otpornosti se shvata kao mera zarezne žilavosti [19, 43]. Što je viši taj odnos, veća je plastična deformacija pri lomu [19]. U ovoj studiji, odnos je bio mnogo veći kod legure 5083 (2.6 do 2.8) nego kod legure 1050A (1.6), videti zadnji red u tabeli 4. Većina Al legura ima odnose čvrstoća cepanja / granica otpornosti ispod 2.0, zavisno od termičkog stanja [19, 45, 58]. Ovo naglašava atraktivnu kombinaciju velike zarezne žilavosti, čvrstoće i duktilnosti za legure 5xxx kao što je legura 5083 [19], koja je stoga pogodan konstrukcioni materijal kod mnoštva zavarenih komponenata koje imaju koncentraciju napona kao što su zarezaji.

#### 4. Zaključci

Dodaci komercijalnih rafinatora zrna Al  $Ti_5B_1$  u TIG metal šava aluminijumskih legura 1050A i 5083 dovode do sledećih rezultata:

- Smanjenje srednje vrednosti veličine zrna u metalu šava od 44% (Legura 5083) do 86% (Legura 1050A)
- Veća efikasnost rafinacije zrna (manje je potrebno rafinatora zrna za minimalnu veličinu zrna) kod legure 1050A nego kod legure 5083
- Promena oblika zrna u metalu šava iz stubičastog u istoosni

Srednja vrednost veličine zrna na epruvetama od osnovnog materijala i zavarenim epruvetama sa različitim metalima šava utiče na tvrdoću, ispitivanje zatezanjem i cepanjem, na sledeći način:

- Tvrdoća ne zavisi od srednje vrednosti veličine zrna u metalu šava od obe legure

- Povećanje duktilnosti kod metala šava od legure 5083 postiže se rafinacijom zrna
- Povećanje (Legura 1050A) i blagi pad (Legura 5083) žilavosti u metalu šava pri rafinaciji zrna

Može se zaključiti da velika čvrstoća, duktilnost i žilavost legure 5083 bivaju umanjene pri zavarivanju zbog nepovoljne veličine, raspodele i hemijskog sastava intermetalnih faza u metalu šava. Komercijalno čisti Al (Legura 1050A) je pokazao snažno reagovanje na dodatke rafinatora zrna i značajno povećanje žilavosti zato što ne sadrži mnogo legirajućih elemenata pa stoga ima mali zapreminski udeo intermetalnih faza.

#### Zahvalnost

Autori zahvaljuju H. Hayen iz Aljo Aluminium-Bau Jonuscheit GmbH, Nemačka i P. Gudde iz KBM Affilips B.V., Holandija na vrlo ljubaznoj donaciji limova od legure 5083 (Alijo) i rafinatora zrna (KBM Affilips). Oni takođe zahvaljuju M. Babiker (ispitivanje zatezanjem i cepanjem), M. Cassau (ispitivanje cepanjem), D. Bettge i S. Bohraus (SEM analiza), G. Oder (WDS analiza), M. Marten i N. Stojkic (metalografija i ispitivanje tvrdoće), H. Strehlau (ICP-OES hemijska analiza), D. Köhler (livenje ingota), W. Großmann (mašinska obrada umetaka) i S. Brauser (merenje izduženja) na velikoj podršci u BAM.

Autori su veoma zahvalni Istraživačkoj asocijaciji dela Zavarivanje i srodni postupci pri DVS na podršci kao i Programu za finansiranje industrijskog razvoja i tehnologije (IGF) nemačkog federalnog ministarstva ekonomije i tehnologije na finansiranju istraživačkog projekta 16.242N.

## Bibliografija

- [1] Roos E. and Maile K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure, Materials Science for Engineers*, Springer, Berlin, first edition, 2002 (in German).
- [2] Hall E.O.: *The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results*, Proceedings of the Physical Society B, 1951, vol. 64, pp. 747-752.
- [3] Petch N.J.: *The Cleavage Strength of Polycrystals*, Journal of the Iron and Steel Institute, 1953, vol. 174, pp. 25-28.
- [4] Cottrell A.H.: *Theory of Brittle Fracture in Steel and Similar Metals*, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1958, vol. 212, no. 2, pp. 192-203.
- [5] Li J.C.M.: *Petch Relation and Granica zrna Sources*, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1963, vol. 227, pp. 239-247.
- [6] Rösler J., Harders H. and Bäker M.: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, Mechanical Behaviour of Materials*, Teubner, Stuttgart, second edition, 2006 (in German).
- [7] Tiryakioğlu M. and Staley J.T.: *Physical Metallurgy and the Effect of Leguraing Additions in Aluminum Leguras*, in: *Handbook of Aluminum*, vol. 1, pp. 81-209, Marcel Dekker, New York, first edition, 2003.
- [8] Hansen N.: *The effect of veličina zrna and strain on the tensile flow stress of aluminium at room temperature*, Acta Metallurgica, 1977, vol. 25, no. 8, pp. 863-869.
- [9] Embury J.D., Lloyd D.J. and Ramachandran T.R.: *Strengthening Mechanisms in Aluminum Leguras*, in: *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 31, pp. 579-601, Academic Press, 1989.
- [10] Lloyd D.J.: *Deformation of fine-grained aluminium leguras*, Metal Science, 1980, vol. 14, no. 5, pp. 193-198.
- [11] Embury J.D.: *Strengthening mechanisms in Al leguras - an overview of natural limits and engineering possibilities*, Materials Science Forum, 1996, vols. 217-222, pp. 57-70.
- [12] Hornbogen E. and Warlimont H.: *Metalle - Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, Metals - Structure and Properties of Metals and Leguras*, Springer, Berlin, fifth edition, 2006 (in German).
- [13] Gottstein G.: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde, Fundamentals of Physics in Materials Science*, Springer, Berlin, first edition, 1998 (in German).
- [14] Phillips V.A., Swain A.J. and Eborall R.: *Yield-Point Phenomena and Stretcher-Strain Markings in Aluminium-Magnesium Leguras*, Journal of the Institute of Metals, 1952, vol. 81, pp. 625-647.
- [15] Staley J.T. and Sanders R.E.: *Property Prediction*, in: *Handbook of Aluminum*, vol. 2, pp. 319-342, Marcel Dekker, New York, first edition, 2003.
- [16] Carreker R.P. and Hibbard W.R.: *Tensile Deformation of Aluminum as a Function Of Temperature, Strain Rate, and Grain Size*, Transactions of Metallurgical Society of AIME, 1957, vol. 209, pp. 1157-1163.
- [17] Staley J.T.: *Microstructure and Toughness of High-Strength Aluminum Leguras*, Journal of ASTM International, Special Technical Publications (STP), 1976, vol. 605, pp. 71-103.
- [18] Hornbogen E. and Starke E.A.: *Theory Assisted Design of High Strength Low Legura Aluminum*, Acta Metallurgica et Materiala, 1993, vol. 41, no. 1, pp. 1-16.
- [19] Kaufman J.G.: *Fracture Resistance of Aluminum Leguras: Notch Toughness, Tear Resistance and Fracture Toughness*, ASM International, Materials Park, Ohio, first edition, 2001.
- [20] Jata K.V. and Starke E.A.: *Fatigue Crack Growth and Fracture Toughness Behavior of an Al-Li- Cu Legura*, Metallurgical Transactions A, 1986, vol. 17, no. 1, pp. 1011-1026.
- [21] Janaki Ram G.D., Mitra T.K., Shankar V. and Sundaresan S.: *Microstructural refinement through inoculation of type 7020 Al-Zn-Mg legura welds and its effect on hot cracking and tensile properties*, Journal of Materials Processing Technology, 2003, vol. 142, no. 1, pp. 174-181.
- [22] Dev S., Archibald Stuart A., Ravi Dev Kumaar R.C., Murty B.S. and Prasad Rao K.: *Effect of scandium additions on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg legura welds*, Materials Science and Engineering A, 2007, vol. 467, no. 1-2, pp. 132-138.
- [23] Seshagiri P.C., Nair B.S., Reddy G.M., Rao K.S., Bhattacharya S.S. and Rao K.P.: *Improvement of mechanical properties of aluminium-copper-legura (AA2219) GTA welds by Sc addition*, Science and Technology of Welding and Joining, 2008, vol. 13, no. 2, pp. 146-158.
- [24] Arata Y., Matsuda F., Mukae S. and Katoh M.: *Effect of Weld Solidification Mode on Tensile Properties of Aluminum Weld Metal*, Transactions of JWRI, 1973, vol. 2, no. 2, pp. 55-61.
- [25] Cui G.R., Ma Z.Y. and Li S.X.: *The origin of non-uniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al-Mg legura*, Acta Materialia, 2009, vol. 57, no. 19, pp. 5718-5729.
- [26] Matsuda F., Nakata K., Tsukamoto K. and Arai K.: *Effect of Additional Element on Weld Solidification Crack Susceptibility of Al-Zn-Mg Legura (Report II)*, Transactions of the Joining and Welding Research Institute, 1983, vol. 12, no. 2, pp. 253-262.
- [27] Dvornak M.J., Frost R.H. and Olson D.L.: *The Weldability and Rafinacija zrna of Al-2.2Li- 2.7Cu*, Welding Journal, 1989, vol. 68, no. 8, pp. 327s-335s.
- [28] Mousavi M.G., Cross C.E. and Grong Ø.: *Effect of scandium and titanium-boron on rafinacija zrna and hot cracking of aluminium legura 7108*, Science and Technology of Welding and Joining, 1999, vol. 4, no. 6, pp. 381-388.

- [29] Schempp P., Cross C.E., Schwenk C. and Rethmeier M.: Influence of Ti and B additions on veličina zrna and weldability of aluminium legura 6082, submitted to *Welding in the World*, accepted for publication, 2012, vol. 56, no. 9 or 10.
- [30] Dvornak M.J., Frost R.H. and Olson D.L.: Influence of Solidification Kinetics on Aluminum Weld Grain Refinement, *Welding Journal*, 1991, vol. 70, no. 10, pp. 271s-276s.
- [31] Spittle J.A. and Cushway A.A.: Influences of superheat and grain structure on hot-tearing susceptibilities of Al-Cu legura castings, *Metals Technology*, 1983, vol. 10, no. 1, pp. 6-13.
- [32] Koteswara Rao S. R., Madhusudhana Reddy G., Kamaraj M. and Prasad Rao K.: Rafinacija zrna through arc manipulation techniques in Al-Cu legura GTA welds, *Materials Science & Engineering A*, 2005, vol. 404, no. 1-2, pp. 227-234.
- [33] Pearce B.P. and Kerr H.W.: Rafinacija zrna in Magnetically Stirred GTA Welds of Aluminum Leguras, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1981, vol. 12, no. 3, pp. 479-486
- [34] Schempp P., Cross C.E., Schwenk C. and Rethmeier M.: Metal šava Rafinacija zrna of Aluminium Legura 5083 through Controlled Additions of Ti and B, *MP Materials Testing*, 2011, vol. 53, no. 10, pp. 604-609.
- [35] Schneider W., StJohn D.H. and Greer A.L.: Solidification Processing of Foundry Leguras: Mechanism of Rafinacija zrna of Aluminium - Almost All You Need to Know, *Proceedings of the 11th International Conference on Aluminium Leguras, Their Physical and Mechanical Properties*, September 2008, Aachen, Germany, vol. 1, pp. 383-392.
- [36] Cibula, A.: The Mechanism of Rafinacija zrna of Sand Castings in Aluminium Leguras, *Journal of the Institute of Metals*, 1949, vol.76, no.4, pp.321 et seqq.
- [37] Crossley F.A. and Mondolfo L.F., Mechanism of Rafinacija zrna in Aluminum Leguras, *Journal of Metals*, 1951, vol. 191, pp. 1143-1148.
- [38] McCartney D.G.: Grain refining of aluminium and its leguras using inoculants, *International Materials Reviews*, 1989, vol. 34, no. 5, pp. 247-260.
- [39] Easton M. and StJohn D.: An Analysis of the Relationship between Grain Size, Solute Content, and the Potency and Number Density of Nucleant Particles, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, vol. 36, no. 7, pp. 1911-1920.
- [40] Bäckerud L., Król E. and Tamminen J.: Solidification Characteristics of Aluminium Leguras, vol. 1, Skanaluminium Universitetsforlaget, Oslo, first edition, 1986.
- [41] Hesse W.: Aluminium-Schlüssel, *Aluminium Handbook*, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, second edition, 2008 (in German).
- [42] ASTM E 112-96:1996, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, Standard USA.
- [43] ASTM B 871-01:2001, Standard Test Method for Tear Testing of Aluminum Legura Products, Standard USA.
- [44] Shi Y., Zhong F., Li X., Gong S. and Chen L.: Effect of laser beam welding on tear toughness of a 1420 aluminum legura thin sheet, *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol.465, no.1-2, pp.153-159.
- [45] Unpublished research from EADS, Germany, 1999.
- [46] Pirondi A. and Fersini D.: Simulation of ductile crack growth in thin panels using the crack tip opening angle, *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, vol. 76, no. 1, pp. 88-100.
- [47] Dvornak M.J., Frost R.H. and Olson D.L.: Effects of Rafinacija zrna of Aluminum Weldability, in: *Weldability of Materials*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1990, pp. 289-295.
- [48] Schempp P., Tang Z., Cross C.E., Pittner A., Seefeld T. and M. Rethmeier: Influence of base metal and solidification parameters on rafinacija zrna in aluminum metal šavade to inoculation, *Proceedings of the 9th International Trends in Welding Research Conference*, June 2012, Chicago, USA.
- [49] Schempp P., Cross C.E., Pittner A. and Rethmeier M.: Influence of solute content and solidification parameters on rafinacija zrna of aluminum weld metal, submitted to *Metallurgical Transactions A*, August 2012.
- [50] Easton M.A. and StJohn D.H.: A model of rafinacija zrna incorporating legura constitution and potency of heterogeneous nucleant particles, *Acta Materialia*, 2001, vol. 49, no. 10, pp. 1867- 1878.
- [51] Schloz J.D.: Fundamentals of Grain Refining Aluminum Leguras, *Light Metal Age*, 2010, vol.4, pp.30-37.
- [52] Maxwell I. and Hellawell A.: A Simple Model for Rafinacija zrna during Solidification, *Acta Metallurgica*, 1975, vol. 23, no. 2, pp. 229-237.
- [53] Turchin A.N., Zuijderwijk M., Pool J., Eskin D.G. and Katgerman L.: Feathery grain growth during solidification under forced flow conditions, *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, no. 11, pp. 3795-3801.
- [54] Zhu H., Kumai S. and Sato A.: Tear Toughness Evaluation of Aluminum Legura Castings Using a Small-Size Specimen, *Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Leguras*, August 2004, Brisbane, Australia, pp. 1160-1166.
- [55] Poklyatsky A.G.: Resistance of welds on thin-sheet aluminium leguras to initiation and propagation of service cracks, *The Paton Welding Journal*, 2011, no. 10, pp. 5-9.
- [56] Czechowski M.: Low-cycle fatigue of friction stir welded Al-Mg leguras, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 164-165, pp. 1001-1006.
- [57] Mondolfo L.F.: *Aluminum Leguras: Structure and Properties*, Butterworths, London, first edition, 1976. [58] Unpublished research from Z. Tang, BIAS, Germany, 2012.