

BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK

Kohászat

MISKOLCI EGYETEM FORR-ÁSZ PROJEKT
TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0019

Anyagtudomány

Felsőoktatás

Hírmondó

148. évfolyam

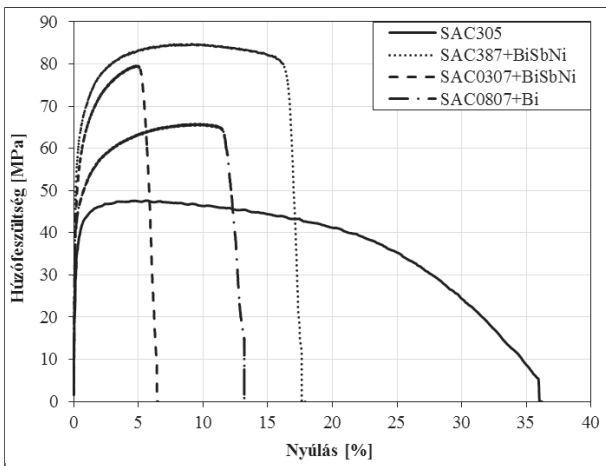
2015/3. szám



Jó szerencsét!

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület lapja.

Alapította Péch Antal 1868-ban.



■ 9. ábra. A vizsgált ötvözetek jellemző szakítódigramjai

szer akkora a szakítószilárdsága, folyáshatára és a keménysége, nyúlása pedig fele, mint a SAC305 ötvözetnek. A SAC0307+BiSbNi és a SAC0807+Bi ötvözetek szakítószilárdság értékei a SAC305 és a SAC387+BiSbNi ötvözetek eredményei között található, míg a SAC0307+BiSbNi ötvözet nyúlása a legkisebb. Ezen különbségek a szövetszerkezetben is látható eltérésekből adódnak, illetve feltehetően a különböző vegyületfázisok és a bizmut együttes szilárdságnövelő hatásának tudhatók be.

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy ha nagy szilárdságú forrasztáshoz van szükségünk, akkor célszerű a SAC387+BiSbNi

költségcsökkentés érhető el.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindenkinek, aki lehetővé tette munkánkat, segítette feladatunk végrehajtását. Külön köszönettel tartozunk *Kissné dr. Svéda Máriának* és *dr. Sycheva Annának* a pártázó elektronmikroszkópos vizsgálatokért, valamint *Mikó Tamásnak* a szakítóvizsgálatok elvégzéséért. Továbbá köszönet illeti a Henkel Magyarország Kft.-t a forrasztóötvözetek biztosításáért.

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0019 jelű projekt

(Innot) ötvözetet alkalmazni, ha azonban nagyobb nyúlású forrasztóanyag kívánatos, akkor ajánlott a SAC305 forrasztóötvözet használata. Abban az esetben, ha nem kritérium a nagy szilárdság vagy a nagymértékű nyúlás, akkor figyelembe véve a gazdasági szempontokat, a SAC0807+Bi forrasztóötvözet alkalmazásával jelentős

részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Dr. Nagy Erzsébet publikációt megalapozó kutatása a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] <http://eur-lex.europa.eu>. (2015.04.20.)
- [2] *H. Ma, J. C. Suhling*: J. Mater Sci. 44 (2009) pp. 1141–1158.
- [3] *J. H. L. Pang*: Lead Free Solder, Mechanics and Reliability, Springer (2012)
- [4] *H. Steen, B. Toleno*: Development of a lead-free alloy for high-reliability, high-temperature applications, http://www.hlinstruments.com/RoHS_articles, (2010)
- [5] <http://elektro-net.hu/gyartasor/2075-sacx-valasz-az-uj-kihivasra-az-olommentes-forrasztas-teruleten> (2015.03.16.)
- [6] *Gyenes A., Lanszki P., Nagy E., Gácsi Z.*: BKL Kohászat, 147/2., pp. 12–17. (2014)

BAUMLI PÉTER

A keményforrasztás alapanyagjai

Keményforrasztás alatt a 450 °C feletti, nem oldható, anyaggal záró kötéstípust értjük, amellyel jelentős mechanikai igénybevételnek kitett munkadarabokat rögzítenek egymáshoz. A kötés minősége nagy mértékben függ attól, hogy egy adott technológiában a megfelelő összetételű forrasztóanyagot használjuk-e. Forrasztókötéssel alakítanak ki oldhatatlan kötést fém-fém páros esetén, de számos helyen kerámia-kerámia, kerámia-fém anyagpár megfelelő kötése is biztosítható keményforrasztással. A forrasztástechnológiában legelterjedtebb keményforrasztóanyag a réz és ötvözetek, a nikkel és ötvözetek, valamint számos területen alkalmazást nyernek a tiszta ezüst és az ezüstalapú ötvözetek is, valamint az alumínium-, magnézium-, cink- vagy a titánalapú forrasztóötvözetek. Jelen összefoglaló munkámban a leggyakrabban alkalmazott forrasztóanyagokat ismertetem.

1. Bevezetés

Forrasztás a diffúziós kötés egyik fajtája. Forrasztás alatt olyan technológiát értünk, amely során szilárd anyagokat kötünk össze a hegesztéshez hasonlóan oldhatatlan kötéssel. A forrasztás során a kötés a forrasztóanyag megolvadásával, majd megszilárdulásával jön létre. A forrasztandó szerkezeti elemek anyagai lehetnek azonosak, pl. acél-acél, de lehetnek különbözőek is, így acél-kerámia.

A forrasztási eljárásokat a forrasztóanyag olvadáspontja alapján két csoportba soroljuk, így beszélünk lágy- és keményforrasztásról. Lágyforrasztásnak nevezzük azt a forrasztási

eljárást, amelyet 450 °C alatt, keményforrasztásnak pedig azt, amelyet 450 °C felett lehet megvalósítani.

Lágyforrasztáshoz különböző ön-alapú ötvözeteket használnak [1], melyeknek az olvadáspontja ötvözötől függően 180–450 °C között változhat. A lágyforrasztást is megkülönböztetjük a forrasztóanyag olvadáspontja szerint, beszélhetünk kis hőmérsékletű és nagy hőmérsékletű lágyforrasztásról. Előbbihez tartoznak az ön-alapú ötvözetek: Sn-Bi, Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, utóbbihoz pedig pl. a Zn-Sn, Zn-In, Cu-Sn, Au-Si [2] ötvözetek. Keményforrasztáshoz legelterjedtebbek a Cu-, Ni-, Ag- és Al-alapú forrasztóötvözetek [3].

A forrasztástechnológia szempontjából az egyik kritikus kérdés a nedvesítés. Azaz, hogy a forrasztóanyag milyen mértékben képes elterülni a forrasztandó fém felületén. A nedvesítés mértéke meghatározza az adhéziót a forrasztóanyag és a szubsztrát (alkatrész) között. Az azonos kémiai kötással rendelkező anyagokról (pl. fémforrasztó-fém-szubsztrát) általánosan elmondhatjuk, hogy közöttük jó nedvesítés figyelhető meg [4], míg különböző kötésű anyagok esetén, így például karbon-fémolvadék (kovalens-fémes kötésű) között rossz nedvesítést tapasztalunk [5–8]. A keményforrasztáshoz használt fémek közül például a korrózióálló acélok felületét ellenálló oxidréteg borítja, amely a nedvesítésnek és így a forrasztásnak is akadályozója lehet [9]. Nagyobb forrasztási hőmérsékleten azonban a fémek felületén lévő oxidhártya már nem okoz problémát, mivel a fém felülete dezoxidálódik, így jó nedvesítést lehet elérni [10, 11].

2. Keményforrasztóanyag családok

2.1. Rézalapú forrasztóanyagok

Az egyik leggyakrabban használt keményforrasztóanyag a Cu, vagy a Cu ötvözetek. A rézalapú forrasztóanyagok között legelterjedtebbek a tiszta réz, a réz-cink és a réz-foszfor ötvözetek. A Cu és a Cu-Zn ötvözetet forrasztóanyagként hasonló körülmények között alkalmazzák vasalapú és nemvasalapú ötvözetek forrasztására. A Cu-P ötvözetet elsősorban rézötvözetek, esetleg ezüst-, volfrám, vagy mo-

libdénötvözetek forrasztására használják [3]. De tiszta rézet acélok, valamint különleges fémötvözetek, mint például Ti-Ni alakemlékező ötvözetek forrasztásához is használnak [12]. A forrasztástechnológiában elterjedt rézalapú ötvözetek még a Cu-Ag [13], Cu-Si [14], Cu-15Ti-10Sn [15], Cu-Ti-Al-Si [16, 17], Cu-Mn-Sn [18]. Acélhoz nemcsak acélt lehet forrasztani rézzel, illetve rézötvözzel, hanem más fémötvözetet, így pl. Ti-Al-ötvözetet [19], magnéziumötvözetet [25], valamint kerámiát [20] is.

Az acél a keményforrasztás hőmérsékletén dezoxidálódik, így valós szilárdfém-fémolvadék határfelület alakul ki a kezdeti szilárd oxid-fémolvadék határfelület helyett, és így javul a nedvesítés az acél és a forrasztóanyag között, ahogy ezt *Kozlova* és munkatársai is igazolták [21]. Azt is megállapították, hogy a Cu-Ag/acél rendszer nedvesítése két lépcsőben történik. Az oxidhártyával fedett korrózióálló acélfelületen a réz-ezüst olvadék kezdeti peremszöge 130° (T = 780 °C), amely rossz nedvesítést jelent. A hőmérséklet emelésével az acél dezoxidálódik, és a Cu-Ag eutektikum peremszöge 30–60° közötti értéket vesz fel, ami már jó nedvesítésnek mondható; ez tulajdonképpen a nedvesítési folyamat első lépése. Nagyobb hőmérsékleten (T = 800–900 °C), illetve hosszabb kontaktusidő (10–20 perc) elteltével a Cu-Ag olvadék az acél egy részét elkezdi beoldani, krátert alakítva ki a szubsztrátban. Ebben a második lépcsőben éri el a Cu-Ag forrasztóanyag az egyensúlyi peremszögét, 10–30° közötti értékkel.

A réz forrasztóötvözetek között kedveltek a Cu-Mn-Sn ötvözetek, amelyek kiválóan alkalmasak lágyacélok forrasztására [18, 22]. A Cu-Mn-Sn ötvözetek további elemekkel, így cériummal és nikkellel ötvözhetőek a határfelületi tulajdonságok javítása érdekében. Ahogy a lágyforrasztók esetében a ritkaföldfémek javítják a forrasztóötvözet nedvesítési tulajdonságait [23, 24], úgy a keményforrasztóötvözetek tulajdonságait is javítja például a Ce [18]. Az 1 tömeg% Ce-t tartalmazó Cu-Mn-Sn-Ce ötvözet nedvesítési tulajdonságai jelentősen javulnak a Cu-Mn-Sn ötvözetéhez képest. A Ce-tartalmú forrasztóanyag területei tulajdonsága 32%-kal növekszik.

A Ce nedvesítésjavító hatása abban rejlik, hogy ennek az elemnek nagy az affinitása az oxigénhez, így elősegíti az acél felületének dezoxidálását.

2.2. Nikkelalapú forrasztóanyagok

A nikkellalapú forrasztóanyagok közül a legtöbbet használt, valamint leginkább vizsgált ötvözetek a Ni-Si-B [26], Ni-Cr-B, Ni-Cr-Si, Ni-P [27], Ni-Cr-Si-B [28, 29], Ni-B-Cr-Fe-Si [30]. A nikkellovözetek általánosan használt forrasztóanyagok korrózióállóságuk, valamint hőállóképességük miatt [3].

A nikkell forrasztóanyagot paszta vagy lemez formájában használják, ez utóbbira egy újonnan kifejlesztett példa a réteges Ni-NiCr kompozit [31]. Ennek a kompozit forrasztóanyagoknak a központi magja a Ni-Cr ötvözetből készített lemez, amelyet tiszta nikkellémezekkel fednek [31]. A fedőréteg jó hőálló és korrózióálló tulajdonsággal rendelkezik, míg a Ni-Cr központi magot kisebb sűrűség és nagyobb szilárdság jellemzi. Így a Ni-NiCr réteges kompozit egyesíti a fenti két réteg jó tulajdonságát, kis sűrűségű és jól ellenáll a nagy hőmérsékletnek, illetve a korrozív környezetnek [32].

Wu és munkatársai [31] a Ni-Cr-Si-B amorf fóliával készített kompozit forrasztóanyagot 18Cr-8Ni acél forrasztására használták, 1080 °C-on, vákuumban. Ni₃B, (Fe,Cr)B, valamint az acélhoz közel, az acélforrasztóanyag határfelületén Ni₂Cr fázisokat azonosítottak. A kompozit forrasztóanyaggal kiváló kötést kaptak. A Ni-rétegben Ni₃B vált ki, közel a forrasztott részhez, és egy 10 μm-es vastagságú, (Fe, Cr)B szemcséket tartalmazó réteg pedig az acélban.

A forrasztókötésben megjelenő kiválások nem minden esetben kedvezőek. Ni-B-Si forrasztóanyag esetén például, ha nem megfelelően nagy a forrasztási hőmérséklet, bór- és szilíciumkiválások jönnek létre, amelyek a kötés erősségét rontják [33].

Auszténites acél (1.4301) és nikkellalapú szuperötvözet nikkellalapú forrasztóanyaggal történő forrasztását vizsgálva azt tapasztalhatjuk, hogy a forrasztás hőmérsékletét emelve, a forrasztott kötés szakítószilárdsága növekszik. Ennek az a magyarázata, hogy az eutektikus fázis mennyisége

a hőmérséklet emelésének hatására csökken és növekszik a szilárd oldat mennyisége [33].

A keményforrasztáshoz használt ötvözeteket, így például a nikkellapú forrasztanyagot, titánalapú forrasztötvetet, valamint Ag-5Pd ötvözetet összehasonlíthatjuk aszerint, hogy az adott forrasztanyag a forrasztandó fémet milyen mértékben nedvesíti, illetve hogy a forrasztanyag-olvadék diffundál-e a szubsztrátba, azaz milyen minőségű forraszkötés létrehozására alkalmasak. Ezek alapján az ausztenites acél (STS304) és titánötvetet anyagpár forrasztásakor a legjobb forraszkötést a nikkellapú ötvözetekkel lehet elérni, legrosszabbat pedig az Ag-5Pd ötvözetrel [34].

2.3. Ezüstalapú forrasztanyagok

Az ezüstalapú ötvözetek alkalmasak vas- és nemvasalapú ötvözetek forrasztásához, kivéve az alumínium- és a magnéziumötvözeteket [3].

Acélok kerámiákhoz, illetve intermetallikus vegyületekhez történő forrasztásához alkalmas ötvözet az Ag-Cu-Zn [35, 36]. Az Ag-Cu-Ti forrasztötvetfémek intermetallikus fázishoz történő forrasztására [37] vagy kerámia-kerámia anyagpár forrasztására is [38] alkalmas. Fém-fém anyagpár forrasztását, így például a titánnak forrasztását Ag-Cu ötvözetrel hajtották végre [39].

A fémekeket borító oxidhártya az ezüstötvetetrel történő forrasztás esetén is problémát jelenthet. *Tashi* és munkatársai Ti-6Al-4V ötvözet és ausztenites acél (1.4404) forrasztathatóságát vizsgálva megállapították, hogy az ausztenites acélt az alkalmazott Ag-Cu-Zn ötvözet kevésbé nedvesíti, mint a Ti-6Al-4V ötvözetet [36]. Az acél rossz nedvesítését azzal magyarázták, hogy az ausztenites acél felületét vékony króm-oxid réteg fedi. A forrasztandó acél felületének dezoxidálását az Ag-alapú forrasztanyaghoz adagolt ritkaföldfémek, így például a Ce elősegítheti. Ag-Cu-Ti ötvözet nedvesítését vizsgálva acélon azt tapasztalhatjuk, hogy a forrasztanyag nedvesítése már 0,25 tömeg% Ce hozzáadásával jelentősen javítható. Azonban a forrasztanyag Ce-tartalmát tovább növelve az ötvözet nedvesítési tulajdonsága

az acélon romlani kezd. A nedvesítési tulajdonságok romlása pedig maga után vonja a mechanikai tulajdonságok romlását is [40].

Liu és társai [41] cirkónium és korrózióálló acél forrasztását vizsgálták Ag-Cu-TiH₂ forrasztanyag felhasználásával. Megállapították, hogy a forrasztás hőmérséklete nagyobb mértékben befolyásolta a kötés erősségét, mint a hőntartási idő.

2.4. Alumíniumalapú forrasztanyagok

Alumíniumalapú forrasztanyagokat, így az Al-Si ötvözeteket [3, 44], valamint Al-Si-20Cu ötvözeteket [42, 43] alumínium és alumíniumötvözetek forrasztására használják elsősorban.

Az Al-Si-20Cu forrasztanyag mechanikai tulajdonságai, valamint a nedvesítése szilárd alumíniumfelületen javítható a forrasztötvethez adagolt ónnal, amely a forrasztanyag olvadáspontját is csökkenti [42]. Az Al-Cu ötvözet alkalmas acél, nikkell és egyéb ötvözetek forrasztására is [45].

3Si-4N ötvözet különböző fémekkel (például Ti, Nb, Ni, illetve acél) való összeforrasztása során Al-Cu forrasztanyagot használhatunk. Ebben az esetben a kis (1-10 tömeg%) réztartalom az Al-Cu ötvözet nedvesítési tulajdonságait kis mértékben javítja a 3Si-4N szubsztráton, a tiszta alumíniumhoz képest ($\Theta_{Al}=50^\circ$). A 10 tömeg% Cu-Al olvadék peremszöge 3Si-4N szubsztráton 45° . Mintegy 10 tömeg% Cu-tartalomtól kezdődően a Cu-tartalom emelésével a forrasztanyag nedvesítési tulajdonságai közel lineárisan romlanak, míg el nem éri a tiszta réz peremszögértékét a 3Si-4N szubsztráton ($\Theta_{Cu}=130^\circ$) [45].

Az alumíniumlemez alumíniumlemezhez történő forrasztása általában Al-Si forrasztanyaggal történik [44], ami kivitelezhető úgy is, hogy a forrasztanyag a megfelelő összetételű Al-Si ötvözet, de a forrasztás és a hegesztés határán lévő módszerrel is. Ez utóbbi esetben a forrasztandó részecskékre Si-szemcsékből és folyasztószerből álló keveréket visznek fel. A forrasztás hőmérsékletén a forrasztandó alumínium egy részéből és a Si-szemcsékből eutektikum keletkezik, amely kisebb olvadáspontjával létrehozza a forrasztott kötetést [46].

A fentiekben részletezett forraszt-

anyagokon kívül létezik egy sor, kevésbé használatos, vagy éppen különleges igényeket is kielégítő forrasztötvetet. Tipikus példák erre: magnéziumalapú forrasztanyagok magnéziumötvözetek forrasztására, vagy a titánötvözetek forrasztásához használt titánalapú forrasztanyagok [47], valamint erre a célra cinkalapú ötvözetek is léteznek [48]. Találunk a szakirodalomban aranyalapú forrasztanyagcsaládot is, amelyet nemesfémek forrasztásán túl vas-, nikkell- és kobaltötvözetek forrasztására használnak, ahol fontos az oxidáció- és a korrózióállóság [3].

3. Összegzés

Összefoglaló cikkemben a keményforrasztáshoz használt forrasztötveteket mutattam be. A keményforrasztást az ipar számos területén alkalmazzzák, ahol fém-fém anyagpárokat (pl. autóhűtők), fém-kerámia, vagy kerámia-kerámia anyagpárokat kell nem oldható kötéssel rögzíteni. A keményforrasztás során a forrasztandó fém nem olvad meg, csak a forrasztanyag. Forrasztás során a kisebb hőmérsékletnek köszönhetően kisebbek lesznek a feszültségek, elhúzóerők, mintha a kötetést hegesztéssel alakították volna ki. Természetesen a keményforrasztás során azzal is számolnunk kell, hogy a forrasztás helyén az anyag korrózióra érzékenyebb lesz, és maga a forrasztott kötés is kisebb szilárdságú, mint a forrasztandó alanyag.

Forrasztáshoz a leggyakrabban alkalmazott anyagok a réz- és a nikkellalapú ötvözetek, de felhasználási területtől függően elterjedtek az ezüst-, arany-, cink-, titán-, magnéziumalapú forrasztötvetek is. Ezek a forrasztanyagok paszták, lemezek, huzalok formájában készülnek és kerülnek felhasználásra. A keményforrasztás esetében szükséges a forrasztanyag védelme az oxidációtól különböző folyasztószerrel, vagy vákuum, illetve inert gáz alkalmazásával.

A keményforrasztás minőségével két szabvány foglalkozik (az MSZ EN ISO 18279:2003:Keményforrasztás. A keményforrasztott kötésekben lévő eltérések, és az EN ISO 12797:2005 A forrasztott kötések roncsolásos vizsgálatáról). Jelen összefoglaló

munkában nem tértem ki ezen vizsgálati és minősítő módszerekre. A kötés megfelelőségét a nedvesítési tulajdonságokon keresztül véleményeztem, ahogy az az irodalomban is előfordult.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0019 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. A szerző kutatási tevékenységét a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával végzi.

Irodalom

- [1] Anyagok Világa (Materials World) 1 (2015) 24–34.
- [2] K. Sukanuma, S.-J. Kim, K.-S. Kim: JOM, 61 (1) (2009) 64–72.
- [3] G. M. Slaughter, D. A. Canonico: Nuclear Engineering and Design 17 (1971) 181–203.
- [4] O. Kozlova, R. Voytovych, P. Protosenko, N. Eustathopoulos: Journal of Materials Science 45 (2010) 2099–2105.
- [5] Z. Weltsch, J. Hlinka, A. Lovas: In: Stanislaw Borkowski, Dorota Klimecka-Tatar (szerk.), QUALITY IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS. Konferencia helye, ideje: Wawrzkowizna, Lengyelország, 2014. 05. 21.–2014. 05. 23. Czestochowa: Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedzerów Jakosci i Produkcji (SMJiP), 2014. pp. 54–65. (ISBN:978-83-63978-12-9)
- [6] J. Hlinka, L. Rédey, Z. Weltsch: In: Stanislaw Borkowski, Dorota Klimecka-Tatar (szerk.), QUALITY IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS. Konferencia helye, ideje: Wawrzkowizna, Lengyelország, 2014. 05. 21.–2014. 05. 23. Czestochowa: Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedzerów Jakosci i Produkcji (SMJiP), 2014. pp. 66–74. (ISBN: 978-83-63978-12-9)
- [7] Z. Weltsch, J. Hlinka, E. Kókai: World Academy of Science Engineering And Technology, 9:(3) (2015). 342–345.
- [8] J. Hlinka, Z. Weltsch: 30th International Colloquium – Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Visegrad, Hungary 2013. 05. 22–24., pp.13–16, editor: J. Takacs, T. Markovits, B. Vehovszky (ISBN: 978-963-313-079-7)
- [9] N. Eustathopoulos, M. Nicholas, B. Drevet: Pergamon Materials Series, vol. 3, Pergamon, Oxford, 1999.
- [10] P. Protosenko, A. Terlain, M. Jeymond, N. Eustathopoulos: Journal of Nuclear Materials 307–311 (2002) 1396–1399.
- [11] P. Protosenko, N. Eustathopoulos: Journal of Materials Science 40 (2005) 2383–2387.
- [12] T.Y. Yang, R. K. Shiue, S. K. Wu: Intermetallics 12 (2004) 1285–1292.
- [13] M. Hirota: Trans. JIM 9 (1968) 97–103.
- [14] A. Koltsov, N. Bailly, L. Cretteur: Journal of Materials Science 45 (2010) 2118–2125.
- [15] S.-F. Huang, H.-L. Tsai, S.-T. Lin: Materials Transactions 43 (10) (2002) 2604–2608.
- [16] M. Singh, T. P. Shpargel, G. N. Morscher, R. Asthana: Materials Science and Engineering A, 412–413 (2005) 123–128.
- [17] B. Schwarz, P. Worbs, C. Eisenmenger-Sittner: Journal of Physics: Conference Series 100 (2008) 082044
- [18] S. K. Chatterjee, Z. Mingxi, A. C. Chilton: Welding Journal 71(5) (1991) 118–122.
- [19] H. Dong, Zhonglin Yang, Zengrui Wang, Dewei Deng, Chuang Dong: Journal of Materials Science & Technology (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2014.04.003>
- [20] V. Bissig, M. Galli, J. Janczak-Rusch: Advanced Engineering Materials 8 (3) (2006) 191–196.
- [21] O. Kozlova, R. Voytovych, M.-F. Devismes, N. Eustathopoulos: Materials Science and Engineering A 495 (2008) 96–101.
- [22] V. R. Miller, W. L. Falke: Report of Investigations 8783, United States Department of the Interior, 1983
- [23] D. Q. Yu, J. Zhao, L. Wang: Journal of Alloys and Compounds 376 (2004) 170–175.
- [24] Bo-In Noh, Jung-Hyun Choi, Jeong-Won Yoon, Seung-Boo Jung: Journal of Alloys and Compounds 499 (2010) 154–159.
- [25] X.-J. Yuan, G.-M. Sheng, J. Luo, J. Li: Transactions of Nonferrous Metals Society of China 23 (2013) 599–604.
- [26] X. Yuan, C. Y. Kang, M. B. Kim: Materials Characterization 60 (9) (2009) 923–931.
- [27] R. K. Shiue, S. K. Wu, C. M. Hung: Metallurgical And Materials Transactions A, 33A (2002) 1765–1773.
- [28] X. Wu, R. S Chandel, H. Li, H. P Seow, S. Wu: Journal of Materials Processing Technology 104 (1–2) (2000) 34–43.
- [29] A. Rabinkin, E. Wenski, A. Ribado: Welding Journal, 77 (1998) 66s–75s.
- [30] C. L. Ou, D. W. Liaw, Y. C. Du, R. K. Shiue: Journal of Materials Science 41 (2006) 6353–6361.
- [31] N. Wu, Y. Li, J. Wang: Vacuum 86 (2012) 2059–2063.
- [32] J.-K. Kim, T.-X. Yu: Journal of Materials Processing Technology 63 (1997) 33–42.
- [33] X. Wu, R. S. Chandel, H. P. Seow, H. Li: Journal of Materials Processing Technology 113 (2001) 215–22.1
- [34] T. Chung, J. Kim, J. Bang, B. Rhee, D. Nam: Transactions of Nonferrous Metals Society of China 22 (2012) 639–644.
- [35] L. X. Zhang, J. C. Feng, P. He: Materials Science and Engineering A 428 (2006) 24–33.
- [36] R. S. Tashi, S. A. A. Mousavi, M. M. Atabaki: Materials and Design 54 (2014) 161–167.
- [37] P. He, J. C. Feng, W. Xu: Materials Science and Engineering A 418 (2006) 53–60.
- [38] T. Yano, H. Suematsu, T. Iseki: Journal of Materials Science, 23 (9) (1988) 3362–3366.
- [39] R. K. Shiue, S. K. Wu, C. H. Chan: Journal of Alloys and Compounds 372 (2004) 148–157.
- [40] C. Yang, J. Xu, W. Ding, Z. Chen, Y. Fu: Journal of Rare Earths, 27 (6) (2009), p. 1051–1055.
- [41] G. W. Liu, G. J. Qiao, H. J. Wang, J. F. Yang, T. J. Lu: Journal of the European Ceramic Society 28 (2008) 2701–2708.
- [42] L. C. Tsao, T. C. Tsai, C. S. Wu, T. H. Chuang: Journal of Materials Engineering and Performance 10 (2001) 705–709.
- [43] S. S. Wang, M. D. Cheng, L. C. Tsao: T. H. Chuang, Materials Characterization 47 (2001) 401–409.
- [44] R. K. Shiue, S. K. Wu, S. Y. Chen: Intermetallics 11 (2003) 661–671.
- [45] M. Naka, M. Kubo, I. Okamoto: Transaction of JWRI, 19(1) (1990) 33–38.
- [46] R. S. Timsit, B. J. Janeway: Welding Journal, (1994) 119–128.
- [47] R. K. Shiue, S. K. Wu, Y. T. Chen, C. Y. Shiue: Intermetallics 16 (2008) 1083–1089.[48]
- [48] J. G. Lee, J. K. Lee, S. M. Hong, M. K. Lee, C. K. Rhee: Journal of Materials Science 45 (2010) 6837–6840.