



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Járműgyártás és –javítás Tanszék*

## **OTKA záró beszámoló**

**azonosító: K-73690**

**Nedvesedési folyamatok vizsgálata fémes olvadékok és kerámia fázisok között, különös tekintettel az elektrokapilláris jelenségek, a felületi koncentrációviszonyok és a fajlagos felület nagyságának szerepére**

Vezető kutató:

.....  
Dr. Takács János  
tanszékvezető, egyetemi tanár

Budapest, 2012. július. 24.

## Bevezetés

A fémes olvadékok és szilárd kerámia-fázisok közötti nedvesedési jelenségek fenomenológiai leírása kidolgozott, hosszú ideje művelt területe a kísérleti metallurgiának és az anyagtudománynak [1, 2]. Az utóbbi két évtizedben azonban megújult az érdeklődés néhány új típusú szerkezeti és szenzoranyag előállítási technológiáihoz kapcsolódóan [3]. Példaként említhető néhány kompozit-típus alkotó fázisai közötti adhéziós kapcsolatok megértése (pl. grafit-szálakkal erősített, Al-matrix fejlesztése), néhány foyadékfázisú szinterelési folyamat, vagy új típusú forrasztási technológiák bevezetése [4]. Ehhez a problémakörhöz köthető részben a kisméretű (100-200 nm átmérőjű), üvegbevonatos lágymágneses szenzor-huzalok előállításakor, vagy pl. a miniatürizált autó-lámpatestek árambevezetései körül lezajló öregedési jelenségek megoldatlan technológiai problémái [5, 6]. A feltűnően szerteágazó jelenségek mögött azonban minden esetben felismerhetők bizonyos karakterisztikus méretjellemzők és a velük együtt fellépő, termodinamikai szempontból nem-egyensúlyi koncentráció-eloszlások. Ezek tehát akkor jelennek meg, ha a szóban forgó rendszerben legalább egy dimenzióban  $10^2$ - $10^3$  nm-es méretekhez közeli tartományokban határfelület akkumulációról beszélhetünk. Ezekben a mérettartományokban fokozatosan egyre jelentékenyebbé válik ugyanis az úgynevezett topológiai és – több komponensű rendszerek esetén – a kémiai összetétellel kapcsolatos metastabilitás szerepe, és így a tömbi tulajdonságok megváltozása is [7]. Tipikusan ilyen mérettartományokba esnek a fázisok közötti nedvesedésben nagy szerepet játszó határrejtegek is. A vázolt jelenségcsoportra lényeges a befolyása a környező atmoszféra összetételének, valamint a határfelületek hőmérsékletének is.

### Irodalomjegyzék a bevezetéshez:

- [1] S. Z. Beer (1972): Liquid metals, Chemistry and physics. – Marcel Dekker Inc., New York, ISBN 0-8247-1032-0
- [2] F. D. RICHARDSON (1974): Physical Chemistry of Melts in Metallurgy. – Academic Press London Vol. 2. Ch. 12. ISBN: 0-12-587902-4
- [3] Gy. Kaptay, L. Bolyán (1998): Kerámiával erősített fémmátrixú kompozitok gyártásának határfelületi vonatkozásai. II/1. Kohászat bányászati és kohászati lapok 131. évfolyam 5-6, 9-10. szám
- [4] J. Takács, A. Lovas, J. Berzy, P. Gál, A. Szilágyi, T. Markovits (2001): Laser brazing of aluminium. –Budapest University of Technology and Economics, Research News 2001/1
- [5] Bálint P. (2006): Miniatűr autólámpák anyagköltség csökkentése a fém-üveg kötés javításával. – Diplomamunka, BME Járműgyártás és -javítás Tanszék
- [6] M. Vázquez, K. L. Garcia, K. R. Pirota, R. Varga (2004): Influence of the magnetoelastic mechanism on the switching field fluctuations of Fe-based amorphous microwires. – Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54. D17, ISSN 00114626
- [7] J. Weismüller (1993): Alloy effects in nanostructures. – Nanostructured materials, Vol. 3., pp.261-272. Pergamon Press Ltd. USA

### A kutatás során elért eredmények

A munkaterv szerint tanulmányoztuk az egyensúlyi cseppalak kialakulásának dinamikáját idő és hőmérsékletfüggését a már korábban kifejlesztett berendezésben. A berendezés lényeges eleme egy használaton kívüli elektronmikroszkóp vákuumkamrája, amelyben a vákuum létrehozása, ill. a védőgáz átöblítés lehetősége kis átalakítással kivitelezhető volt [3]. Mindenekelőtt programozható fűtőteljesítményű tápforrást adaptáltunk hozzá. Házi kivitelezésű védőgáz tisztító ill. gázkeverő egységet csatoltunk a berendezéshez. A fejlesztéseket diplomatervező feladatok elkészítésében hasznosítottuk [1, 2]. A modell-anyagaink nagytisztaságú Ag ill. Ag-alapú, ún. „elektronfázisok” olvadáki voltak. (Ag-Cd, Ag-In, Ag-Sn, Ag-Sb), amelyeket kooperációban, az MTA Szilárdtest-fizikai Kutató Intézetében készítettük.

Fejlesztő feladataink teljesítése után a nyugvó csepp alakját jellemző peremszög változásának hőmérsékletfüggését vizsgáltuk nagytisztaságú grafit és  $\text{Al}_2\text{O}_3$  szubsztrátokon nagy időfelbontású kamera segítségével. Az olvadákok nedvesítő képességének hőmérsékletfüggését a peremszög változásának optikai kiértékelése útján állapítottuk meg. Ezek után vizsgáltuk az ötvözőelemeknek az Eötvös szabálytól való eltérésben megnyilvánuló-hatását, ill. annak koncentrációfüggését [4].

Ezek után nagyobb energiát fordítottunk a kísérleti eredmények értelmezésére. Megállapítottuk, hogy noha kémiai szempontból mindkét szubsztrát anyag kémiai szempontból inert a vizsgált olvadákokkal szemben,- az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  szubsztráton az ötvözőelemtől és azok koncentrációjától függetlenül minden esetben kisebb peremszögeket mértünk, ez arra utal, hogy ezen olvadákok a nedvesítő képessége az oxid szubsztráton nagyobb ugyanolyan atmoszférikus körülmények között (Ar védőgáz). Az eltérést nem a felületi érdességek közötti különbség okozza. A felületen adszorbeált oxigén eltérő kötésiállapotának, ennek ellenére szerepe lehet a különbség kialakulásában. [5].

Az ötvözők által okozott átlagos vegyérték-elektron szám növekedés (ami egyidejűen szisztematikusan növekvő elektronegativitás különbséget is jelent a komponensek között), ugyancsak szisztematikus változáshoz vezet a nedvesedési peremszög értékében, és annak hőmérsékletfüggésében. Az ötvözők kémiai karakterüktől és koncentrációjuktól függően csökkentik a peremszög hőmérsékletfüggését. A peremszög hőmérsékletfüggésében megállapítható szisztematikus változás a tömbi szilárd ötvözetben mérhető fajlagos ellenállás-változással, ill. a termofeszültség változásával, és –az irodalomból ismert– Young modulus értékével mutat kapcsolatot [6].

AgZn<sub>10</sub>, AgCu<sub>10</sub>, valamint AgGa<sub>10</sub> ötvözetek olvadákiaknak –azonos olvadákihőmérsékleten mért– peremszög értéke összefüggést mutat a csepp megszilárdult állapotában mérhető határfelületi textúrával [7].

Az utólagos mechanikai vizsgálatokat, illetve a kristályszerkezetben bekövetkezett változásokat vizsgálatunk CSM Micro-HV-Tribo-Tester segítségével. Az ehhez szükséges csiszolatokat a nedvesítés szempontjából lemerített mintákból készítettünk, az eredmények közötti kapcsolatokat kerestünk. Az ily módon elkészített mintákat további vizsgálatoknak vetettük alá együttműködésben az ELTE-s projekt partnerekkel és az MTA Szilárdtest-fizikai Kutató Intézetével.

Különböző fémolvadákok esetében vizsgáltuk az elektrokapilláris jelenséget fémolvadék-kerámia rendszerben, annak hatását a nedvesedési viszonyokra. Nagy sebességű kamera segítségével az egyenáram bevezetésekor bekövetkező gyorsan lejátszódó folyamatokat elemeztük. A kísérletekben résztvevő anyagpároknál jelentős nedvesítést változtató hatást nem tapasztaltunk. Az ilyen irányú kísérletek folytatásához a mérőberendezés jelentős átalakítására lett volna szükség (árambevezetés helyének, módjának megváltoztatása,

manipulátor alkalmazása), mely jelentős anyagi következményekkel járt volna, melyet nem terveztünk be a kutatásba. Mivel a kutatás másik iránya eredményesebbnek bizonyult, ezért ebben az irányban folytattuk tovább a kutatást.

Konstrukciós változtatást hajtottunk végre a berendezés fűtőrendszerében: célunk az ellenállás-fűtésű kályha működésével kapcsolatos oxigén-deszorpció csökkentése volt. A kifejlesztett duplafalú kvarcüveg szigetelés fajlagos felülete lényegesen kisebb mint a korábban használt szigetelő paplan felülete, így a szigetelőanyag felületen megtapadt oxigén mennyisége jelentősen csökkent a nedvesedési peremszög mérések során, tiszta ezüstön végzett peremszög mérési eredményeink megegyeztek az irodalmi adatokkal [14].

Az ezüst alapú kísérletsorozattal párhuzamosan elindítottunk a szerződésben foglalt gyakorlati nedvesedési vizsgálatosorozatot. Alumínium alapanyagoknál vizsgáltuk az eutektikus összetételű KF-AlF<sub>3</sub> folyasztószer nedvesítésre gyakorolt hatását.

Alapanyaggént ötvözetlen Al (1050A), és Mg-mal és Si-mal ötvözött (6016) alumínium lemezeket, illetve csöveket használtunk. A lemezek felületén elhelyezett eutektikus összetételű AlSi<sub>12</sub> 0,8 mm átmérőjű huzal anyagok hőmérséklet hatására bekövetkező terülését, nedvesítését vizsgálva az eredmények alapján megállapítottuk, hogy az alumínium felületén lévő oxidréteg az alapanyaghoz képest nagyobb olvadáspontja miatt jelenlétével meggátolta a felületek megolvadását, így a területét és a nedvesítést is [9].

A kísérletekben használt NOCOLOK flux folyasztószer alkalmazásakor - az oxidréteget a hevítés során még a megolvadás előtt feloldva - lehetővé vált az alacsonyabb olvadáspontú huzal megolvasztása és a lemezen és cső alapanyagokon történő elterülése és jó nedvesítése, amely a folyasztószer alkalmazása nélkül nem volt megoldható.

Meghatároztuk a lézeres színterezésnél a pásztázási sebességek (teljesítmény sűrűségek) hatását a színterezés megvalósíthatóságára Fe, Ni, Cu(P) anyagoknál, valamint az elkészített minták nyomószilárdságát meghatároztuk.

Folytattuk a bulk tulajdonságok és az olvadékállapot nedvesítése közötti kapcsolat feltárását. A kutatási eredményekből kiderült, hogy mind grafit, mind Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> szubsztáron az e/a változásának hatására szisztematikusan változnak a peremszög értékek. Vizsgáltuk a mérések során az Eötvös szabály érvényesülésének mértékét, az elektronszerkezeti változás arra gyakorolt hatását [10].

Termofeszültség méréssel vizsgáltuk az ezüst alapú ötvözetek alapanyagait szilárd fázisban, amelyeken a nedvesedés mérési vizsgálatokat is végre hajtottunk. A termofeszültség mérési eredmények egyértelműen kimutatják az elektronszerkezeti változást a különböző anyagokban. A mérési eredményeket összevetve nedvesedés mérési eredményekkel bizonyítást nyert, hogy kapcsolat áll fenn a szilárd állapotban mért termofeszültség és az olvadék állapotban vizsgált nedvesedési peremszög között [6].

Elektromos ellenállás mérési mintákat készítettünk elő, melyek segítségével a termofeszültség mellett egy általánosan ismert és elfogadott méréssel is alátámasztanánk a kapcsolatot a tömbi anyagtulajdonságok és a nedvesedési peremszög értékek között. Az eredményekből látható, hogy az elektronszerkezeti változtatás, „szennyezés” rontja a tiszta ezüst vezetési tulajdonságát, és ezzel párhuzamosan rontja a nedvesedési tulajdonságait is szilárd oldat tartományban [18].

A nedvesedési peremszög mérési mintákat a mérés befejezése után, szilárd halmazállapotban

XRD méréseknek vetettük alá, és az eredményekből rámutattunk, hogy az egyes esetekben különbség tapasztalható az atomi szintű struktúrában, mely különbség egyértelműen mutatkozik a nedvesedési peremszög értékében is. A grafit szubsztrát, és az egyes ötvöző anyagok hatása kimutatható volt XRD mérésekkel, melyek korreláltak a nedvesedési peremszög értékekkel [7, 11].

Anyagösszetétel vizsgálatokat hajtottunk végre szkennig elektronmikroszkóppal. Vizsgáltuk, hogy a kialakult, és megszilárdult cseppen belül mennyire egyenletes az ötvöző anyagok eloszlása, ennek milyen hatása lehet a peremszög értékekre. Elemeztük továbbá, hogy a vizsgálat során mennyi ötvöző anyagot veszít a minta, valamint, hogy az alkalmazott grafit szubsztrátokba, milyen mélységig és mennyi anyag kerül bele [7, 11].

Közös együttműködésben Dr. Kaptay Györggyel egy átfogó kísérletsorozatba kezdtünk bele, mellyel a fázisdiagram alakja és a nedvesedési peremszög értékek között teremtenénk kapcsolatot, elméleti számolási értékekkel hasonlítanánk össze a mért peremszög értékeket. Ezüst-ón anyagpárt kiválasztva elkészítettük (sajnos az első minták összetétele nem volt kifogástalan) a szükséges mennyiségű ötvözeteket, és elindítottuk a kísérleteket.

A 2009-es kutatási évben bevezetett kemenceszigeteléshez kapcsolódóan további fejlesztéseket hajtottunk végre, megszüntetve a nagy felülettel rendelkező szigetelés elemeket, így tovább csökkentve a vákuumkamrában mérés során bennmaradó oxigén mennyiségét. Stabilabb mérési körülményeket alakítottunk ki, melyek lehetővé teszik a nagy hőmérsékleteken végzett huzamosabb méréseket is.

Külön az OTKA által támogatott engedéllyel beszerzésre került a 2010-es évben egy nagy felbontású digitális fényképezőgép, mely segíti a kialakult olvadék cseppekről készített felvételek kiértékelését, a kiértékelésből adódó szórás jelentős mértékben csökkenthető vele. A nagy felbontású, jó minőségű felvételek lehetővé tették, hogy automatikus módszerrel értékeljük ki a nedvesedési peremszög értékeket. Kifejlesztettünk egy automatikus peremszögmérő programot Matlab környezetben. A program automatikusan beolvassa a csepről készített felvételt, leméri a peremszög értékeket, és az eredményeket digitális formátumban egy fájlba tárolja el. A program segítségével egyszerűsödik a mérések kiértékelése, így a kiértékelési szórás minimálisra csökken [12].

Rodenstock RM600-as lézeres felületi topográfiai vizsgáló berendezéssel vizsgáltuk az alkalmazott szubsztrátok felületi érdességi értékeit, felületi topográfiáját. Vizsgáltuk, hogy milyen hatással van az érdességi topográfia a nedvesedés mérési szórásra. Az eredményekből kiderült, hogy a szubsztrátok felületi érdessége nagyon kicsi ( $Ra=0.23\pm 0.005$ ), és szórásuk elhanyagolhatóan kicsi, tehát a felületi érdesség lényegében nem befolyásolhatja a mérési eredményeket [10].

Nagysebességű kamerás vizsgálatokhoz, tervezett beruházás keretében, fejlesztettük a kutatóhelyen található nagysebességű kamera fényforrását, mellyel nagysebességű felvételeket tudunk elkészíteni az olvadék csepp kialakulási folyamatáról, a frekvenciafüggetlenségből adódóan fényerősség változás nélkül. A szilárd halmazállapotú cseppet hevítve, majd elérve az olvadáspontot a csepp rövid idő (~5 ms) alatt alakul ki. A csepp kialakulás jelentős hatással van a nedvesedési peremszögre. A mért peremszög értékek szórásának jelentős része a csepp kialakulásakor keletkezik. A mérési eredményekből kiderült, hogy a nem megfelelően előkészített mintákon látható oxidhártya felszakadása befolyásolja a mért peremszöget [12, 14].

Vizsgáltuk a nedvesedési peremszög időfüggését, az eredményekből arra a következtetésre jutottunk, hogy a nedvesedési peremszög a cseppkialakulás pillanatában felveszi az értékét, ezt követően csak a hőmérséklet megváltoztatása után változik értéke. Mérési eredmények alapján a nedvesedési peremszög 2 percen belül nem mutat változást [16].

Tiszta ezüst és ezüst ötvözetek és grafit szubsztrát között mért peremszög értékeknél meghatároztuk a hőmérsékletfüggést, mely az Eötvös szabállyal ellenkező irányban változik. Bizonyítást nyert, hogy a jelenséget a grafit szubsztrát és ezüst olvadék között keletkező gázfejlődés okozza. A gázfejlődés megfordítja a Marangoni-áramlást, amely az irodalomból jól ismert hatással hőmérséklet növekedésével romló nedvesedési viszonyokat idéz elő [12, 17].

Modellt állítottunk fel, mely leírja az elektronszerkezet változásából eredő felületi feszültség többletet. Sommerfeld-modellből kiindulva az elektronokat egymástól független a fémen belül szabad részecskékként tételeztük fel. Az energiát kvantumosan számoltuk ki, és a Fermi-Dirac statisztikát alkalmaztuk zérus és alacsony hőmérsékleten. A felszín hatását az egyik irányú, nulladik közelítésben végtelen, illetve első közelítésben nagy, a kilépési munkát reprezentáló véges potenciál bevezetésével vettük figyelembe. A felülettel rendelkező és a tömbi anyag energiakülönbségére a felülettel arányos mennyiséget kaptunk. Az elektronsűrűség a fal mellett egy fermi hullámhossz széles tartományban leesik, ezért az elektronok kisebb térfogatba vannak bezárva, és az emiatt megnőtt kinetikus energia adja a felületi energiát [13].

$$\gamma = \frac{\hbar^2}{m} \frac{1}{32\pi} (3\pi n)^{\frac{4}{3}}$$

Így fizikai levezetésekkel is ugyan arra a következtetésre jutottunk, mint a peremszög mérési eredmények esetében.

Ezüst-ón ötvözetsorozaton a peremszögmérés után szilárd állapotban végrehajtott XRD, SEM, és TEM vizsgálatokkal bebizonyítást nyert, hogy a megszilárdulás során kialakuló fázisok meghatározó szerepet játszanak az ötvözet nedvesítési tulajdonságainak alakulására, ami nem meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy a csepp alakja a megszilárdulás során, vizsgálataink szerint már nem változik, tehát a közeli rend az atomi kölcsönhatások következtében már olvadék állapotban kialakul.

Vizsgálataink rámutattak arra, hogy nem csupán az új fázis megjelenése okoz lényeges változást a peremszög értékekben, hanem az egyes fázisokban bekövetkező túltelítettség is [12].

A kutatás utolsó periódusában a mérési eredmények kerültek részletesen értelmezésre. Több egy összefoglaló cikk került megírásra, melyek publikálása folyamatban van.

Az összefoglalt eredményeket a szakma legrangosabb konferenciáján mutattuk be, a High Temperature Capillarity konferencián. A konferencián való részvétel érdekében volt szükséges a kutatási periódus fél éves meghosszabbítására. A konferencia 3 évente kerül megrendezésre, és témája a nagy hőmérsékletű nedvesedés méréssel foglalkozik. A konferencián bemutatott eredményekre volt több érdeklődő, egy tájféldi és egy amerikai kutatócsoporttal is felvettük a kapcsolatot a további együttműködés reményében.

A kísérleti minták anyagait az eddigi eredmények alapján bővítettük, az ezüst alapú ötvözeteken kívül réz- és aranyalapú ötvözeteket is készítettünk.

A réz-ón alapú ötvözetek további folytatása a már korábban említett ME-i együttműködésnek, ahol kétkomponensű ötvözetek peremszög számító modelljének eredményeit támasszuk a kísérleti eredményekkel. Ezüst-réz-ón ötvöző hármast választottuk ki, mert ez képezi az alapját a gyakorlatban használatos forraszanyagok döntő többségének.

A kutatómunka eredményeiből a BME KSK Járművek Mobil Gépek Doktori Tanácsa benyújtásra elfogadta:

Weltsch Zoltán: Nedvesedési jelenségek vizsgálata Ag-alapú olvadékok és kerámiák között a járműipari kötéstechológiák megalapozásához című PhD értekezésének témavázlatát, a dolgozat beadása 2012-ben várható.

#### **A kutatómunka eredményeinek felhasználásából megjelent diplomatervek:**

- [1] L. Bazsika: A környező atmoszféra összetételének szerepe olvadék-kerámiák közötti nedvesedés vizsgálatában, Diplomamunka, 2008, BME-KSK, JJT
- [2] Z. Weltsch: Fémolvadékok és szilárd kerámiafázisok közötti nedvesedés vizsgálata nyugvó csepp módszer segítségével, Diplomamunka, 2008, BME-KSK, JJT

#### **A kutatómunkából megjelent publikációk:**

- [3] O. Udvardy, A. Lovas: Wetting phenomena and the related experimental difficulties in the measuring techniques at elevated temperatures, 24th International Colloquium, Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry, Svitavy, 2007, pp.91-97. ISBN 978-80-7194-962-6
- [4] O. Udvardy; Z. Weltsch: On the shape of Ag-based phase diagrams and the wetting ability of Ag-based molten alloys on graphite substrate, Materilas Engineering, Vol. 15, 2008, No. 2a, ISSN 1335-0803
- [5] Z. Weltsch, A. Lovas: The Investigation of Wetting Phenomena between Ceramic Substrates and Molten Ag-M (M=Cd, Sn, Sb) Alloys, Journal of Machine Manufacturing, Volume XLIX. (2009) Issue E3-E5, Special Triple Edition, HU ISSN 0016-8580, pp 40-42.
- [6] A. Szabó, Z. Weltsch, A. Lovas: Compositional and stress-sensitive factors during the thermopower characterization of single phase crystalline and glassy alloys, Materials Science Forum Vol. 659, (2010), ISSN: 1662-9752, pp 343-348.
- [7] Z. Weltsch, A. Lovas, J. Takács, A. Cziráki, G. Tichy, A.L. Toth, L. Illés: Wetting Ability of Ag Based Molten Alloys on Graphite Substrate, Nanocomposite Coatings and Nanocomposite Materials, Solid State Phenomena Vol. 159 (2010) pp 117-120.
- [8] Z. Weltsch, Z. Kalincsák: Wetting Problems on Soldering Pipes, Journal of Machine Manufacturing, Volume XLIX. (2009) Issue E3-E5, Special Triple Edition, HU ISSN 0016-8580, pp 43-45.
- [9] T. Markovits: Investigation of laser brazing of aluminim, Materials Science Forum Vol. 659, ISSN: 1662-9752, 2010
- [10] Z. Weltsch, A. Lovas: Alloying effects on wetting ability of diluted Ag-based melts on ceramic substrates, Materials Science Forum Vol. 659, (2010), ISSN: 1662-9752, pp 109-113.

- 
- [11] Z. Weltsch, A. Lovas, A. Cziráki, G. Tichy, A.L. Toth: Wetting ability of Ag(Cu, Zn, Ga) alloys on graphite substrate, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 15, No. 2, (2010), ISSN 1425-1655, pp. 389-395.
  - [12] J. Hlinka, Z. Weltsch, J. Berzy, A. Szmejkál: Improvements of Sessile Drop Method for the Wetting Angle Determination, *Perner's Contact, Special Issue 2, Volume VI, Pardubice* (2011), ISSN 1801-674X, pp. 64-71
  - [13] Z. Weltsch, A. Lovas, G. Tichy, Z. Vandrus: Bulk Electron Concentration and the Surface Tension of Liquid Ag-Based Solutions, *Perner's Contact, Special Issue 2, Volume VI, Pardubice* (2011), ISSN 1801-674X, pp. 221-227
  - [14] Z. Weltsch, T. Bodolai: Nagy sebességű kamera, mint korszerű vizsgálati technika, *Anyagvizsgálók lapja*, 2011/3-4, pp. 94-98, HU ISSN 1787-507, (2011)
  - [15] Z. Weltsch, Zs. Fogarassy, A. Lovas, J. Takács, A. Cziraki and G. Tichy: Alloying effects on wetting ability of Ag-based melts on graphite substrates, publikálás alatt;
  - [16] Z. Weltsch, A. Lovas, J. Takács, A. Cziráki, A.L. Toth, G. Kaptay: Measurement and Modelling of the Wettability of Graphite by a Silver-Tin (Ag-Sn) Liquid Alloy, publikálás alatt, *Applied Surface Science*
  - [17] Z. Weltsch, A. Lovas: The Relation between the Surface Tension and the Bulk Properties of Diluted Silver Based Melts, *Materials Science Forum*, publikálás alatt;
  - [18] Z. Weltsch, A. Lovas: Wettability of Graphite Substrates by Silver Based Alloys, *HTC 2012*, publikálás alatt;
  - [19] Z. Weltsch, J. Hlinka: The Effect of Reflow on Wettability of Sn 96.5 Ag 3 Cu 0.5 Solder, *Materials Engineering*, publikálás alatt.

**A kutatási eredmények oktatásban fontos részleteit beépítettük a következő jegyzetbe:**

- [20] Lovas A., Bán K., Balla S., Szabó A., Weltsch Z, Bárdos A.: *Járműanyagok*, BME KSK, Kecskeméti Főiskola; Egyetemi jegyzet, Typotex kiadó, 2012