

Dr. Kovács Tünde*, Schramkó Márton**

Elektroakusztikai és képlékeny alakváltozási elméletek az ultrahangos hegesztésben, elemzés kísérleti eredmények alapján

1. Bevezetés

Az ultrahangos hegesztés fizikai alapja az elektroakusztikus, a képlékeny alakváltozás, valamint a súrlódásból adódó hő hatására bekövetkező változások a kristályszerkezetben. A nagy frekvenciájú ultrahang rezgés energiát visz a kristályrácsba [1-6]. A hegesztett kötés az ultrahangos hegesztés során a munkadarabot érő komplex hatás eredménye. A létrehozott kötés fizikai és mechanikai tulajdonságai a hegesztett anyag kristályszerkezetétől és a benne található rácshibáktól is függenek. Az anyagok mechanikai tulajdonságaiiban bekövetkező változások a diszlokáció elméletre alapozva magyarázhatóak. A képlékenységtan összefüggései a felületen középpontos köbös kristályrácsú anyagokra ismertek [2, 7-9]. A szilárd testek rugalmas tulajdonságai a rugalmasságtan szerint értelmezettek. Ismert, hogy a valós kristályszerkezetű anyagok számos hibát tartalmaznak. Ezek a hibák az üres rácshelyek, beékelődő vagy helyettesítési saját, illetve idegen atomok. A képlékeny alakváltozás során megfigyelhetők a csúszó síkkal elmozduló vagy maradó területek. Az eltérő területek határán új, vonalszerű kristályhiba keletkezik, ez a diszlokáció. Az első alkalmazott diszlokáció elméletet Taylor, valamint tőle függetlenül Orowan és Polányi alkotta meg. A képlékeny alakváltozás során éldiszlokáció keletkezik, ami végig haladva a rácson elcsúszást eredményez. Az éldiszlokáció a kristályrácsban extra félsík kialakulását eredményezi.

A diszlokációk termodinamikailag nem stabilak, ez azt jelenti, hogy számuk a kristályrácsban a hőmérséklettől függően változhat [2, 10-12].

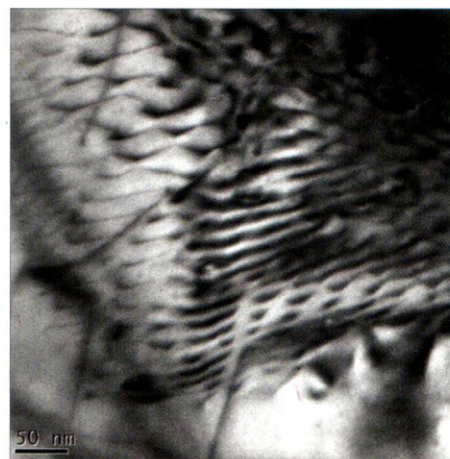
Másik, kristályszerkezet szempontjából igen fontos hatás, amely a mechanikai tulajdonságokra is hatással van, az alakítási keményedés jelensége. A képlékeny alakváltozás, feszültség függő kristálysík elcsúszást okoz. Ugyanakkor ismert az alakítási lágyulás is, amely hőmérséklet változással kísért jelenség.

Meg kell említeni, tekintettel a hegesztési eljárásban alkalmazott ultrahang miatt, az akusztikus lágyulási jelenséget, Blaha és Langenecker munkája alapján [13], a rugalmas hatás, ami csökkenti a feszültséget a szilárd testekben. Ezt a hatást mind egykristály, mind polikristályos anyagok esetén is kimutatták. Számos kutatási eredmény alapján megállapítást nyert az ultrahang hatásra bekövetkező lágyulás és a feszültség amplitúdó közötti kapcsolat [2]. Szintén megállapítást nyert, hogy a tapasztalt lágyulás független az oszcillációtól, ha a frekvencia 15–80 kHz közötti, a képlékeny alakváltozás maximuma 16% és a folyamat 20–500 °C között megy végbe. Az ultrahang hatására a diszlokációk elmozdulnak, és a belső feszültségek leépülnek. Az ultrahang hatására létrejövő diszlokáció-sűrűség csökkenés és kristályszerkezeti változások kísérletekkel igazoltak [9, 13]. Az 1. ábra egy TEM (Transzmissziós Elektronmikroszkópi) kép egy alumínium próbatestben a diszlokációk rendeződéséről.

A képlékeny alakváltozás, a súrlódás okozta hő és az elektroakusztikai energiabevitel eredményeként dinamikus újrakristályosodás és lágyulással együtt járó szemcsefinomodás tapasztalható a hegesztett kötésben. Az ultrahangos hegesztés során a munkadarabot ért komplex hatások kristályszerkezetben okozott változásai az alkalmazott hegesztési paraméterek, valamint a felhasznált alapanyag esetében még nem ismertek teljes körűen.

Az ipari gyakorlatban az előírt mechanikai tulajdonságok elérése (megfelelő kötésszilárdság) a cél, amelyhez optimális hegesztési paraméterek szükségesek. Ezek meghatározásához a fizikai és kristálytani elméletek adnak alapot [14-16].

Az iparban, azon belül is az elektronikai iparban, gyakran szükséges különböző fémkábelek és csatlakozó elemek rögzítése. Ez sok esetben, például az informatikai eszközöknél, megoldható forrasztással, de ez egy autó vagy

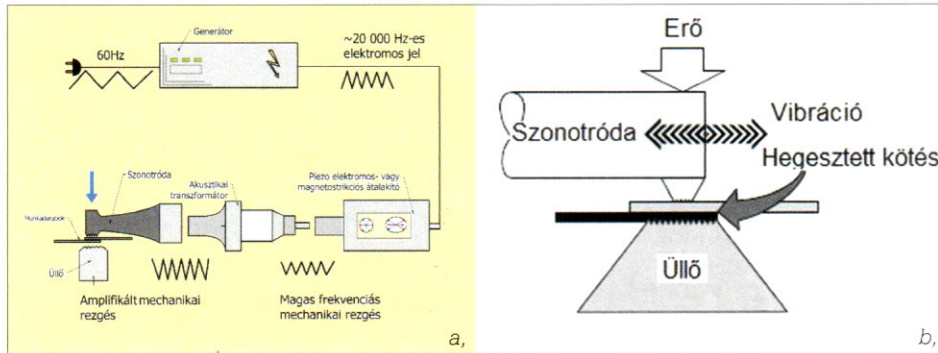


1. ábra. Ultrahanggal hegesztett alumínium próbatestben a diszlokációk rendeződéséről készült TEM felvéte.

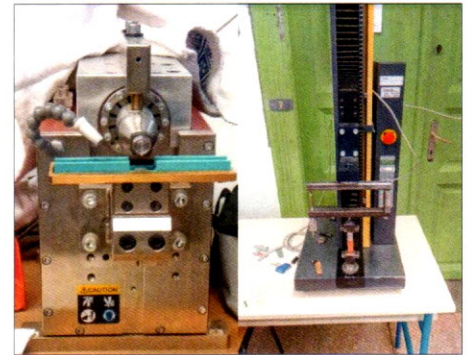
egy hajó esetében könnyen elégtelennek bizonyulhat, ugyanis a forrasztóanyag nem csak mechanikai, de környezeti (kémiai) hatásoknak is kitett, ezért a károsodási folyamat agresszívebben jelentkezik. (Hajók esetében például a korrózió miatt teljesen eltűnik akár egy év használat után a forrasztás, a párás levegő elektrolit hatása miatt.) Ezen okok miatt széles körben folynak kutatások, hogyan lehetne kiváltani ezeket a forrasztott kötések. A kötés létrehozása során az okoz nehézséget, ami sokszor felmerül, hogy eltérő anyagok között is kell fémes kötést létesíteni, a kontakt korrózió elkerülésével, ami nehéz feladat. Kísérleti eredmények alapján megállapítható, hogy az ultrahangos hegesztés alkalmas számos különböző fém összehegesztésére, kis hőhatásövezet mellett kielégítő szilárdságú fémes kötést létrehozni mind azonos, mind vegyes kötések esetén (leggyakrabban Al-Cu; Al-Al; Cu-Cu anyagpárok) [17-19].

2. Az ultrahangos hegesztés

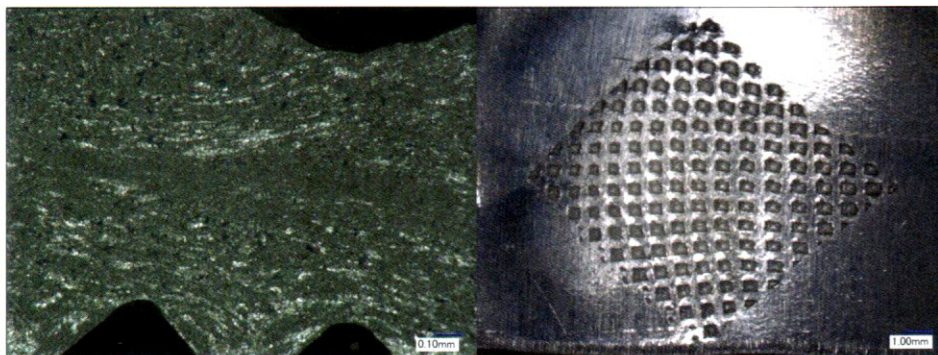
Az erősített mechanikai rezgések generátorral táplálva magnetostriktív vagy piezoelektromos elven jönnek létre, majd az akusztikai transzformá-



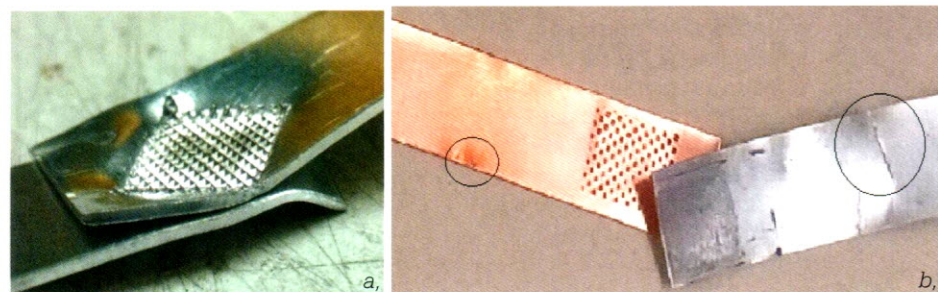
2. ábra. A gép sematikus ábrája [21, 22]



5. ábra. Az ultrahangos hegesztő berendezés és a szakítógép [21]



3. ábra. Alumínium-alumínium lemez ultrahangosan hegesztett varrata
a.) keresztmetszete és b.) felülete



4. ábra. Jellegzetes károsodások

tor átalakítja, és a szonotródán keresztül lehetővé válik a kötés kialakítása. A folyamatot a 2. ábra mutatja be.

Az ultrahangos hegesztési eljárás (2. b ábra) során a munkadarabot nagyfrekvenciájú (20–40 kHz) rezgések érik. Anyagminőségtől függően ez kifáradást, esetleg törést is okozhat. A nagy képlékenységgű anyagoknál ez a hidegsajtoló hegesztési eljárás előnyös (pl.: Al, Cu anyagok) kohéziós kötés létesítésére, mert a megfelelő paraméterek alkalmazása mellett alig vagy kis mértékben befolyásolja az anyag szövetszerkezetét a kötésben és a hőhatásövezetben, ezért a mechanikai tulajdonságok sem változnak számottevően. A 3. ábra alumínium lemez hegesztett kötésének metszetét mutatja be, látható a képlékeny alakítás hatására létrejött maradó alakváltozás (az üllő mintázata a felületbe másolódik).

A nem megfelelő hegesztési paraméterek alkalmazása nem megfelelő kötés kialakítást okoz, ridegedéshez, repedéshez vagy a hegesztett kötésben és a hőhatásövezetben a nagy hőhatás által keletkezett elszíneződésekhez, olvadáshoz vagy megégéshez vezethet. Az ultrahangos hegesztési eljárással létrehozott kötés megfelelősége erősen függ az alkalmazott paramérektől. A hibás paraméterekkel végzett hegesztés okozta károsodások jellegzetes példáit a 4. a, és 4. b, ábra mutatja be, amely túlzott maradó alakváltozás vagy repedés is lehet.

3. Hegesztési paraméterek meghatározása kísérleti úton

A hegesztési kísérleteket egy Branson Ultraweld L20 típusú ultrahangos hegesztőgéppel végeztünk (5. ábra), majd

a hegesztett mintákat egy Zwick szakítógéppel (3. ábra) vizsgáltuk (nyíró szakító vizsgálat). A hegesztő gép maximálisan 0,69 MPa nyomást tud előállítani a hegesztés során. A hegesztés ideje maximálisan 5 perc lehet, de ha a megadott maximális teljesítményt túllépi, a berendezés vészleállást végez. Az alkalmazott szakítógépnél a maximális szakító erő 1000 N volt.

A kísérlet során tiszta (vörös) réz huzal és sárgaréz kábelcsatlakozó összehegesztését végeztük (pontos kémiai összetétele nem ismert). A 3 mm átmérőjű huzalokból 100 mm hosszú kísérleti darabokat vágunk. A kábelvégek az alkalmazott huzalhoz, kereskedelmi forgalomban kaphatók. A szakító próbát ezeken a darabokon végeztük, melynek eredményét a 6. ábra mutatja. A huzal hegesztés előtt mért folyáshatára $R_{eH} = 78$ MPa volt.

A kísérleteink során az időparamétert a szakirodalom alapján választottuk meg, majd ezt próbahegesztésekkel ellenőriztük, ebből jól látható volt, hogy a 0,80-0,85 s hegesztési idő intervallumból kilépve a kötés szilárdsági paraméterei drasztikusan romlanak.

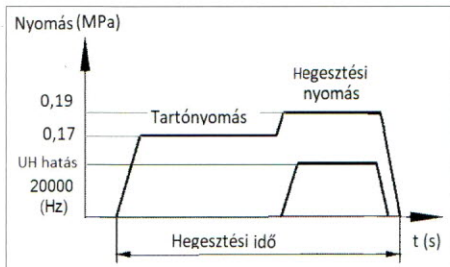
Amennyiben a hegesztési időparaméter túl kicsi, akkor nem alakul ki kötés, amennyiben túl nagy, abban az esetben pedig a nagy hőképződés beégésekhez, illetve a kötés vagy a huzal esetleg a kábelvég károsodásához vezethet.

Ezt követően a hegesztés másik paraméterének az amplitúdónak a vizsgálatát végeztük el. Az 7. ábrán látható diagram a hegesztett munkadarab nyíró szakító vizsgálatát során meghatározott folyáshatár ($R_{p0,2}$) változását mutatja be az amplitúdó függvényében.

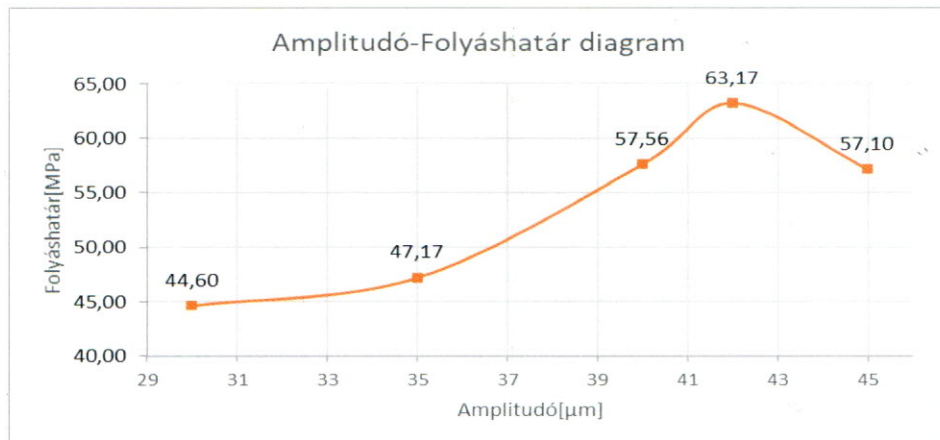
A diagramon jól látható, hogy az amplitúdó változtatása nagyban befolyásolja a hegesztett kötés szilárdsági eredményét, az optimális amplitúdóval nagy folyáshatárt (63 MPa) tudunk elérni (amplitúdó $A = 42 \mu\text{m}$), majd az amplitúdót növelve a kötés minősége



6. ábra. Huzal és kábelvég szakítás után



8. ábra. Ultrahangos hegesztés munkarendje [22]



7. ábra. A folyáshatár az amplitúdó függvényében



9. ábra Kábel-kábelvégek kötése [25]

ismét romlani kezd. A megfelelő amplitúdó eléréséig a huzal és kábelvég közti kötés nem alakult ki, majd ezt az amplitúdó értéket meghaladva ismét nem-megfelelőséget tapasztalunk.

Az eljárás alkalmazása során a varrat minőséget több paraméter pontos beállítása alakítja, ezek pontos, finomhangolása elengedhetetlen a megfelelő hegesztett kötés létrehozásához. A legfontosabb paraméterek az ultrahangos hegesztés során az amplitúdó, a hegesztési idő, a kapcsolódó felület, valamint az összeszorító erő által létrehozott nyomás az ultrahang hatás előtt (tartónyomás) és alatt (hegesztési nyomás). A hegesztési munkarendet a 8. ábra szemlélteti.

Speciális huzal és kábelcsatlakozó hegesztése során a nem megfelelő szorító nyomás alkalmazása negatívan befolyásolja, roncsolhatja a huzal szálait, esetleges szakadásokat okozva a huzalban, ami a vezetőképeséget és a kötésszilárdságot is ronthatja. Az amplitúdó és időparaméter együttesen az ultrahangos hatással hozza létre a hegesztett kötet, a nem megfelelő beállítás a kötésben hibákat okoz.

Az iparban már régóta használják a különböző ultrahangos eljárást, például az akkumulátorok csatlakozásainak hegesztéséhez és több különböző elektronikai eszközhöz vagy akár huzalok egyesítéséhez. Egyes ultrahangos hegesztési kísérletek esetén, mikor huzal egyesítést végeznek az ajánlott értékek a következők: idő(s): 0,82 s amplitúdó(a): 25 μm illetve az energia: 1760 Ws [23, 24]. Ezen eseteknél általában megadnak egy kezdeti magasság értéket, illetve egy, a folyamat végén elvárt értéket (képlékeny alakváltozásra optimált). Kísérleteink során a kábelvégek hegesztésével foglalkoztunk (erről a 7. ábrán láthatnak illusztrációkat), amelyhez az irodalomban talált értékekből indultunk

ki, és a saját hegesztő gépünkre határoztuk meg az optimális paramétereket.

Összefoglalás

A kísérletsorozat eredményeként meghatároztuk az elvárt kötésszilárdságot biztosító paraméter együttest az alkalmazott ultrahangos hegesztő berendezéshez. Hegesztési idő ($t=0,82$ s ... $0,84$ s között), az amplitúdó paraméter $A = 42 \mu\text{m}$, a tartónyomás (T.P. = $0,18$ MPa) és a hegesztési nyomás (W.P. = $0,207$ MPa).

Az ultrahangos hegesztés során kialakult mechanikai tulajdonságok erősen függenek a hegesztési paramérektől, ezt nyíró szakító vizsgálattal ellenőriztük.

A mikroszerkezet kialakulásában jelentős szerepe van a képlékeny alakváltozásnak (tartó-, és hegesztési nyomás), ennek hatására bekövetkező alakítási keményedésnek, valamint a súrlódási hő okozta lágyulásnak, miközben dinamikus újrakristályosodás is bekövetkezhet. A hegesztési idő és az amplitúdó megválasztása a keletkező hő miatt kiemelten fontos.

A hegesztési eljárás elvi alapja az elektroakusztikus emisszió, amely energiát ad át a mikroszerkezetnek, ezzel befolyásolja a diszlokációk mozgását, újabb diszlokációk keletkezését és megszűnését, relaxációt is. Az ult-

rahang hatás diszlokáció elmélete ezt támasztja alá, amelyet a kutatás egy későbbi fázisában TEM vizsgálatokkal igazolni kívánunk.

A felsorolt hatások elemzésére további kísérlet sorozatokat folytatunk, de a hegesztés eredményeként létrejött kötés szerkezetének mechanikai tulajdonságai ismertek, amelyek alapján a gyakorlat számára fontos paraméterek meghatározása elvégezhető.

Az eredmények alapján elmondható, hogy az eljárás, ahogyan már az iparban is használják sok helyen nem véletlenül került be a köztudatban az elmúlt évtizedben, egy igen gyors és hatékony technológia, amely kiválthat más kötéstechnológiákat, fémes kötetet biztosítva hegesztő vagy forrasztó anyag alkalmazása nélkül az ipari mindennapokban.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet kívánnak mondani a Magyar Államnak és az Európai Uniónak az EFOP-3.6.1-16-2016-00010 projekt keretében nyújtott támogatásért.

Absztrakt

(Dr. Kovács Tünde; Schramkó Márton)
Az ultrahangos hegesztés egy viszonylag új és széles területen alkalmazható hegesztési eljárás. Ennek az eljárás-

nak az alapja a kristályszerkezetben az elektroakusztikus és képlékeny alakítás hatására bekövetkező változás, amely eredményeként az összekapcsolt szilárdtestű fémek atomjai fémes, kohéziós kötést hoznak létre. Ebben a cikkben bemutatjuk az ultrahangos hegesztési eljárás mikroszerkezeti hatásait valamint fizikai alapjait.

Továbbá egy gyakorlati alkalmazást mutatunk be, a villamos és autópár számára is fontos huzalok és kábelvégek ultrahangos hegesztésén keresztül. Az alkalmazott színrez huzalt sárgaréz csatlakozó saruval hegesztjük össze. A kísérleti hegesztések eredményeként kapott optimális paraméterek a kötés szilárdságát minősítő nyíró szakító vizsgálat eredményei alapján kerültek meghatározásra.

Abstract

(Dr. Kovács Tünde; Schramkó Márton)

Ultrasonic welding is a relatively new and widely applicable welding process. The base of this process is the microstructural crystal lattice changing due to electroacoustic effect and plastic deformation, as a result of which establish the cohesion bonding of the solid metallic components atoms. In this paper, we present the microstructural effects as well as the physical base of the ultrasonic welding process.

Furthermore, we present a practical application for the ultrasonic welding of wires and cable ends important for both the electrical and automotive industries. The copper wire is welded with a brass connector during the experiments. The optimal parameters of welding, as well as the results of the shear tensile tests qualifying the joint, are presented in this work.

Szakirodalom

- [1] A. A. Ward, M.R. French, D.N. Leonard, Z.C. Cordero, Grain Growth During Ultrasonic Welding of Nanocrystalline Alloys, *Journal of Materials Processing Tech.*, 254, 373, (2018), ISSN: 0924-0136, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.049
- [2] I. Kovács, L. Zsoldos, *Dislocations and Plastic Deformation*, Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford, First edition 1973., ISBN 0-08-017062-5
- [3] C.Y. Gao, L.C. Zhang, A Constitutive Model for Dynamic Plasticity of FCC Metals, *Materials Science and Engineering A*, 527, 3138, (2010), ISSN: 0921-5093, doi: 10.1016/j.msea.2010.01.083
- [4] A. Rusinko, K. Rusinko, *Plasticity and Creep of Metals*, Springer, Berlin, (2011), eBook, ISBN 978-3-642-21212-3, doi: 10.1007/978-3-642-21213-0
- [5] K.W. Siu, A.H.W. Ngan, Understanding Acoustoplasticity through Dislocation Dynamics Simulations, *Philosophical Magazine*, 91, 4367, (2011), ISSN: 1478-6443, doi: 10.1080/14786435.2011.606237
- [6] D. Hull, D. J. Bacon: *Introduction to Dislocations*, Fifth edition, Elsevier, Oxford, (2011), eBook, ISBN: 978-0-08-096672-4.
- [7] J. P. Hirth, L. Kubin, *Dislocations in Solids*, The 30th Anniversary Volume, 16, North-Holland is an imprint of Elsevier, (2010), ISSN: 1572-4859
- [8] C. Chen, C. Zhu, E.R. White, C. Chiu, M.C. Scott, B.C. Regan, L.D. Marks et al, Three-Dimensional Imaging of Dislocations in a Nanoparticle at Atomic Resolution, *Nature*, 496, 74., (2013), doi: 10.1038/nature12009.
- [9] J.R. Groza, J.F. Shackelford, E.J. Lavernia, M.T. Powers, *Materials Processing Handbook*, CRC Press, Boca Raton, (2007), eBook, ISBN: 978-0-8493-3216-6, doi: 10.1080/10426914.2012.689459
- [10] I. Lum, H. Huang, B. H. Chang, M. Mayer, D. Du, Y. Zhou, Effects of superimposed ultrasound on deformation of gold, *Journal of Applied Physics*, 105, 024905, (2009), doi: 10.1063/1.3068352
- [11] M. Shakil, N.H. Tariq, M. Ahmad, M.A. Choudhary, J.I. Akhter, S.S. Babu, Effect of Ultrasonic Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Joints, *Materials and Design*, 55, 263, (2014), ISSN: 0264-1275, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.074
- [12] V. Salinas, F. Lund, N. Mujica, R. Espinoza-González, F.Lunda, N. Mujica, In Situ Monitoring of Plastic Deformation Using Ultrasound, *International Journal of Plasticity*, 97, 178, (2017), ISSN: 0749-6419, doi: 10.1016/j.ijplas.2017.06.001
- [13] M. Tanibayashi, A Theory of the Blaha Effect, *Physica Status Solidi (a)* 128, 83 (1991), ISSN: 1862-6319, doi: 10.1002/pssa.2211280109
- [14] H. Sedaghat, W. Xu, L. Zhang, Ultrasonic Vibration-Assisted Metal Forming: Constitutive Modelling of Acoustoplasticity and Applications, *Journal of Materials Processing Tech.*, 265, 122, (2019), ISSN: 0924-0136, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.10.012
- [15] H. Peng, D. Chen, X. Jiang: Microstructure and Mechanical Properties of an Ultrasonic Spot Welded Aluminum Alloy: The Effect of Welding Energy, *Materials*, 10, 449, (2017), ISSN 1996-1944, doi: 10.3390/ma10050449
- [16] K.W. Siu, H. Liu, A.H.W. Ngan, A Universal Law for Metallurgical Effects on Acoustoplasticity, *Materialia*, 5, 100214, (2019), ISSN: 2589-1529, doi: 10.1016/j.mtla.2019.100214
- [17] S. Kahl, H.E. Ekström, J. Mendoza, Tensile, Fatigue, and Creep Properties of Aluminum Heat Exchanger Tube Alloys for Temperatures from 293 K to 573 K (20 °C to 300 °C), *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45, 663, (2014), ISSN 1073-5623, doi: 10.1007/s11661-013-2003-5
- [18] H. Li, B. Cao, Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Heat-Assisted High-Power Ultrasonic Dissimilar Welded Cu/Al Joint, *Metals*, 9, 873, (2019), ISSN 2075-4701, doi: 10.3390/met9080873
- [19] H. Huang, J. Chen, Y.C. Lim, X. Hu, J. Cheng, Z. Feng, X. Sun, Heat generation and deformation in ultrasonic welding of magnesium alloy AZ31, *Journal of Materials Processing Tech.*, 272, 125, (2019), ISSN: 0924-0136, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.05.016
- [20] <https://www.assemblymag.com/articles/88274-wire-processing-wire-to-wire>
- [21] Schramkó M.: Ultrahangos hegesztés szakdolgozat 2020. ÓE, Budapest
- [22] Kovacs T. A.: Investigation of Imperfections Formed at the Ultrasonic Welding of Copper Sheets, *Acta Materialia Transylvanica* (2019) Volume 2: Issue 1., p. 43-48. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-07>
- [1] Poovannan, A. and Rajiv Gandhi Sallai: Optimization of Ultrasonic Metal Welding Parameters for Copper Sheet to Copper Wire Joints and Numerical Analysis of Ultrasonic Wire Bonding. *Middle-East Journal of Scientific Research* 23 (1): 71-76, (2015) <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2015.23.01.22035>
- [1] Harthoorn, J. L. (1978). *Ultrasonic metal welding* Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven <https://doi.org/10.6100/IR161561>
- [1] <https://www.schunk-sonosystems.com/en/applications/wire-harness>

Dr. Kovács Tünde, egyetemi docens
Schramkó Márton, egyetemi hallgató