

## ANYAGTECHNOLÓGIAI KUTATÁSOK AZ INNOVATÍV ANYAG- TECHNOLÓGIÁK TUDOMÁNYOS MŰHELYBEN

### Gál Viktor

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [gal.viktor@uni-miskolc.hu](mailto:gal.viktor@uni-miskolc.hu)

### Gáspár Marcell

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [gasparm@uni-miskolc.hu](mailto:gasparm@uni-miskolc.hu)

### Kovács Judit

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [metkjudit@uni-miskolc.hu](mailto:metkjudit@uni-miskolc.hu)

### Lukács Zsolt

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [zsolt.lukacs@uni-miskolc.hu](mailto:zsolt.lukacs@uni-miskolc.hu)

### Raghawendra Pratap Singh Sisodia

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [metraghu@uni-miskolc.hu](mailto:metraghu@uni-miskolc.hu)

### **Absztrakt**

A cikkben röviden áttekintjük az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben az elmúlt években végzett, numerikus modellezésre és fizikai szimulációra alapozott anyagtechnológiai kutatások legfontosabb eredményeit, amelyek a járműiparban alkalmazott nagyszilárdságú acél és alumínium ötvözetek hegeszthetőségének és alakíthatóságának elemzésére, valamint a gyártástechnológia fejlesztésére irányultak.

**Kulcsszavak:** lemezalakítás, hegesztés, numerikus modellezés, fizikai szimuláció

### **Abstract**

In present paper the research results about the materials technology of the Innovative Materials Technology Scientific Workshop are briefly summarized. The weldability and the formability of high strength steels and aluminium alloys applied in the vehicle industry were investigated by numerical modelling and physical simulation aiming at the development of the production processes.

**Keywords:** sheet metal forming, welding, numerical modelling, physical simulation

### **1. Bevezetés**

Az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben eredményesen folytatódtak a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 és a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 projekteken elkezdett anyagtechnológiai kutatások, amelyek elsősorban a járműiparban alkalmazott ötvözetek hegesztésére és képlékenyalakítására irányultak [1-3]. Nagyszilárdságú acélok és alumínium ötvözetekkel jelentős sajáttömeg csökkentést lehet elérni, ugyanakkor ezek az anyagok korlátozott hegeszthetőséggel és

alakíthatósággal rendelkeznek, ezért a járműipari alkatrészek előállításához innovatív hegesztés- és alakítástechnológiák alkalmazására van szükség [4, 5]. A gyártástechnológiában rejlő kihívások mellett számos kutatás foglalkozik a nagyszilárdságú acélból és alumínium ötvözetekből készült szerkezeti elemek ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásával, valamint a hegesztéstechnológia fáradási tulajdonságokra gyakorolt hatásával [6, 7]. Az elmúlt időszakban numerikus modellezés, fizikai szimulációval és kísérleti úton elemeztük az anyagtechnológiai folyamatok anyagszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását.

## 2. Fizikai szimulációs vizsgálatok

Az Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézetben megtalálható Gleeble 3500 fizikai szimulátor segítségével szimulációs kísérleteket végeztünk különböző szilárdságú autóiipari alumínium ötvözeteken (5754-H22, 6082-T6, 7075-T6), DP acélokon (DP600, DP800, DP1000, DP1200, DP1400), valamint S690QL, S960QL és S960M nagyszilárdságú, valamint S1300 ultra-nagyszilárdságú acélokon. A szimulációk célja a különböző hőhatásövezeti sávok vizsgálata volt. Miközben alumínium ötvözetek hegesztésekor alapvetően az egyes hőhatásövezeti sávok kilágyulása okoz problémát, addig nagyszilárdságú acélok esetén elsősorban a hőhatásövezet keményedése és a szívósságcsökkenés jelent nehézséget. A szimulációk során alapvetően a hegesztési paraméterek hőhatásövezeti tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltuk, valamint a vizsgált alumínium ötvözetek esetén a LoCoMaTech nemzetközi kutatási projektben szerzett tapasztalatok felhasználásával olyan technológiák alkalmazhatóságát elemeztük, amelyekkel a varrat és a hőhatásövezet kilágyulása mérsékelhető. A teljesség igénye nélkül jelen fejezetben néhány fontosabb eredményt emelünk ki a témakörből.

Az alumínium ötvözetek vizsgálata során először négy különböző hőhatásövezeti sávhoz tartozó csúcshőmérsékleten (550 °C, 440 °C, 380 °C, 280 °C), a vékonylemezek hegesztése szempontjából releváns két különböző fajlagos hőbeviteli (vonalenergia) érték hatását vizsgáltuk meg: 100 J/mm és 200 J/mm. A hőhatásövezeti hőciklusok előállításához tekintettel a 1,5 mm lemezvastagságra a Rykalin 2D modellt használtuk fel. A kísérleti munka ezen szakaszában alapvetően a hőhatásövezet kilágyulási hajlamának számszerűsíthető jellemzésére törekedtünk. A szimulációk után mikroszkópi és keménységvizsgálatokat végeztünk. A kapott eredmények alapján a vizsgált hőhatásövezeti sávok jelentősen kilágyultak. A leggyengébb láncszem elvét követve kiválasztottuk azt a hőmérsékletet, amelynek hatására a próbadarabokon a legkisebb keménységet mértük (például a 7075-T6 ötvözet esetében a 380 °C-ot). Kísérleteink második szakaszában az ehhez a hőmérséklethez tartozó hőhatásövezeti résznek a javítását tűztük ki célul a 7075-T6 ötvözet esetén a HFQ (Hot Forming and in-die Quenching: melegalakítás és szerszámban történő edzés) eljárás alkalmazásával. Az előzőekben kiválasztott hőmérsékleti értéket további technológiai folyamatok (többek között előöregítés, hegesztés utáni öregítés) segítségével vizsgáltuk, szintén a két különböző fajlagos hőbevitelnek megfelelően. Ezután optikai mikroszkópos és keménységvizsgálatokat végeztünk a fizikai szimulációs próbatesteken. A HFQ eljáráshoz kapcsolódó hőkezelések tekintetében az egyes technológiai változatok pozitív hatással voltak a vizsgált próbatestek keménységére, különösen a hegesztést követő utóhőkezelés (mesterséges öregítés) járult hozzá a hőhatásövezet keménységének növekedéséhez.

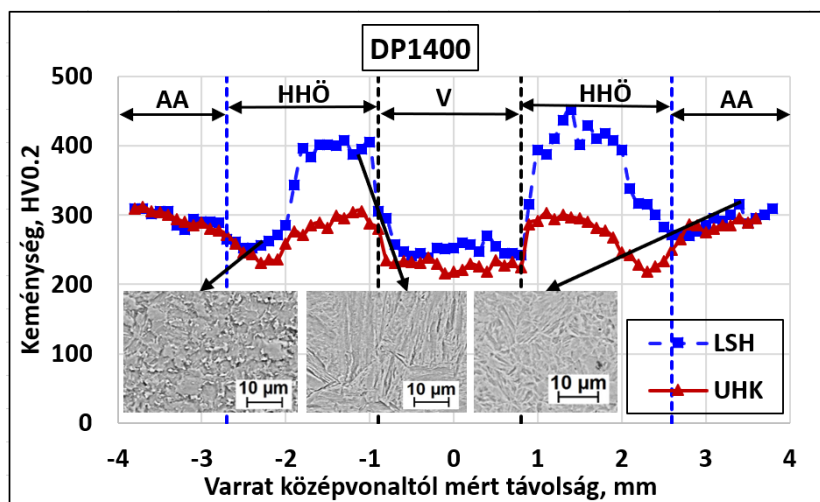
Az S1300 ultranagyszilárdságú acélon végzett hőhatásövezeti szimulációk során a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés különböző technológiai változatai esetén vizsgáltuk a  $t_{8/5}$  hűlési idő hatását a kritikusnak vélt hőhatásövezeti sávokban. A vizsgált hűlési idők  $t_{8/5} = 5$  s, 15 s és 30 s. A kiválasztott hőhatásövezeti sávok a durvaszemcsés ( $T_{\max} = 1350$  °C), az interkritikus ( $T_{\max} = 775$  °C) és az interkritikus durvaszemcsés ( $T_{\max 1,2} = 1350$  °C, 775 °C) sávok voltak. Az általunk végzett kísérletek

szempontjából a választásunk a vastagabb lemezekre érvényes háromdimenziós hővezetést leíró Rykalin 3D modellre esett. A szimulációk elvégzése után a próbatesteken optikai mikroszkópos vizsgálatot, keménységvizsgálatot, és műszerezett ütővizsgálatot végeztünk. Miközben korábbi vizsgálataink során az 1000 MPa alatti folyáshatárú acélok (S690QL, S960QL) esetében a durvaszemcsés sáv keményedését tapasztaltuk, addig az S1300 esetében kilágyulás jelentkezett a hőhatásövezetben. Továbbá a vizsgált acél kritikus hőhatásövezeti sávjaiban jelentős mértékű szívósságsökkenés is végbement az ívhegesztésekre jellemző hűlési idő tartományban, ezért ezeknél az acélkategóriáknál indokolt nagy energiasűrűségű hegesztő eljárások (lézersugaras és elektronsugaras hegesztés) alkalmazása, amelyekkel a kilágyulás mértéke és a hőhatásövezet mérete is csökkenthető.

### 3. Lézersugaras hegesztési kísérletek DP acélokon

Az autóiparban a nagyszilárdságú vékonylemezek hegesztése területén az ellenálláspont hegesztés mellett a lézersugaras hegesztés a legelterjedtebb kötéstehnológia. A kutatómunka során az autogén lézersugaras hegesztés, valamint a hegesztést követő utóhőkezelés szövetszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltuk különböző szilárdsági kategóriájú kettős-fázisú (helyesebben kettős szövetű) DP acélokon. Jelen fejezetben a DP acélok legnagyobb szilárdsági kategóriáját jelentő DP 1400-as típusán végzett kísérleti eredményeinket foglaljuk össze. Nagyszilárdságú acélok-nál a hegesztési hőbevitel hatására jelentős mértékű keményedés megy végbe a hőhatásövezetben, esetenként a varratban, amely növeli a hidegrepedési veszélyt. Utóhőkezelés alkalmazásával a hőhatásövezet és a varrat keménysége csökkenthető, továbbá a szívóssági tulajdonságok is javulnak.

A hegesztési és utóhőkezelési kísérleteket  $300 \times 150 \times 1$  mm vastagságú lemezekon végeztük el robotizált dióda lézersugaras berendezéssel. A diódalézer előnye, hogy a hegesztés és az utóhőkezelés ugyanazzal a technológiával elvégezhető, mivel a fókuszált terület viszonylag széles mérettartományban változtatható. Az optimális hegesztési (teljesítmény: 1 kW, hegesztési sebesség: 8 mm/s, fókuszált terület nagysága:  $2 \times 2$  mm) és az utóhőkezelési paramétereket (teljesítmény: 0,275 W, utókezelési sebesség: 4 mm/s, fókuszált terület nagysága:  $15 \times 6$  mm) előkísérletek alapján határoztuk meg.

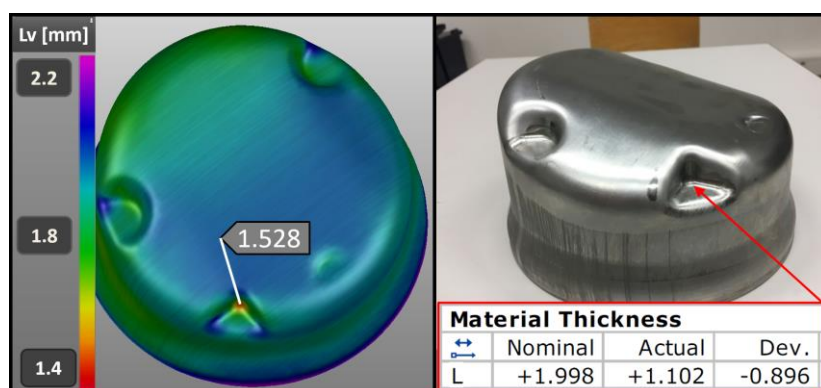


1. ábra. A lézersugaras hegesztett kötés keménységeloszlása DP 1400 acélon utóhőkezelés nélkül és utóhőkezeléssel (AA: alapanyag, HHÖ: hőhatásövezet, V: varrat)

A hegesztési teljesítmény és a hegesztési sebesség alapján a vonalenergia 0.125 kJ/mm volt, amelyhez a mérési úton meghatározott  $t_{8/5}$  hűlési idő 2,8 s értékre adódott. A kísérletek során 4.6 tisztaságú argon védőgázt használtunk. Az elkészült lézersugaras hegesztett kötés keresztirányú keménységeloszlása az 1. ábrán látható utóhőkezelés nélküli (LSH) valamint utóhőkezelt (UHK) esetben. A diagram alapján látható, hogy a hőhatásövezet a durvaszemcsés és a normalizált sávokban a viszonylag rövid hűlési idő eredményeként jelentős mértékben felkeményedik, miközben a részleges átkristályosodási és a kilágyulási sávokban kilágyulás tapasztalható. A hegesztést követő utóhőkezelés hatására a kritikus hőhatásövezeti sávok keménysége az alapanyag szintjére csökken, miközben a kilágyult részek keménysége nem csökken tovább jelentős mértékben. Érdeemes megjegyezni, hogy hozaganyag alkalmazásával a varrat tulajdonságai javíthatók.

#### 4. Lokális elvékonyodás modellezési lehetőségei

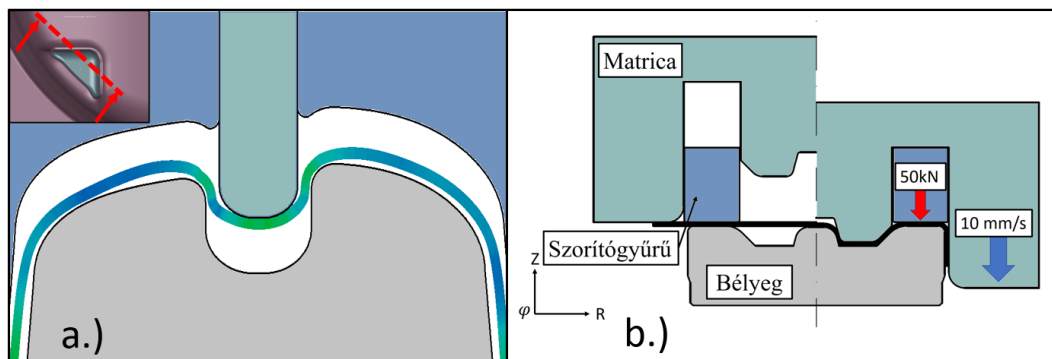
Az autóiipari lemezalkatrészek gyártását mára szinte minden esetben számítógéppel segített technológia, illetve szerszámtervezés előzi meg. Az egy-egy alkatrész legyártásához szükséges nagy szerszám-költségek arra ösztönzik a mérnököket, hogy a gyártást megelőző szimulációk a lehető legpontosabban becsüljék meg a várható eredményt. Ennek elérése érdekében nagy hangsúlyt fektetnek a lemez képlékeny viselkedését leíró anyagkártya (folyásgörbe, folyási határfelület, alakítási határdiagram) pontos definiálására, valamint a gyártásnál megjelenő fizikai környezet akkurátus leírására. Ahogy azt a 2. ábra egy valós ipari alkatrészen szemlélteti, még a legpontosabb virtuális szimuláció esetén is lehet jelentős eltérés annak eredménye, illetve a fizikailag legyártott darab között.



2. ábra. A virtuálisan és a fizikailag legyártott alkatrész összehasonlítása

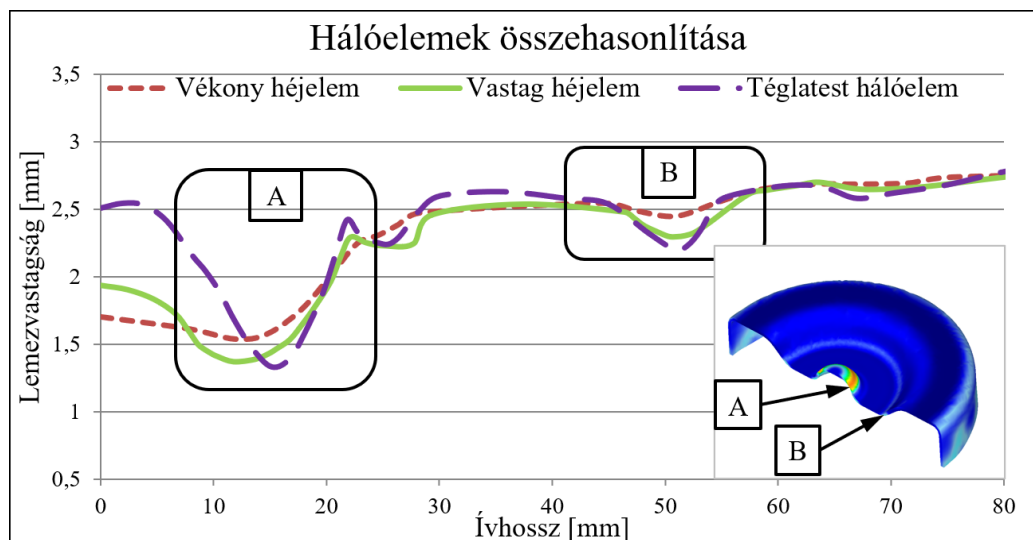
A szemléltetett ipari alkatrésszel kapcsolatos szimulációs probléma vizsgálatához szükség volt egy egyszerűsített geometriára, amely megfelelően reprodukálja a fellépő alakváltozási állapotokat, mindemellett lehetőséget ad a hatékony és összehasonlító kiértékelésre. A 3. ábra a.) része szemlélteti a 2. ábrán bemutatott kritikus geometriai elem alakadásának összetett folyamatát, amelynek legfőbb eleme, hogy a pozíciónálként szolgáló szem kialakítása ellentétes irányban történik a fő húzási iránnyal.

A 3. ábra b.) részén a vizsgálatokhoz választott egyszerű alkatrészgeometria látható. Ennek az ipari alkatrész gyártási folyamatának modellezése a 2018-as NUMISHEET Konferencia Benchmark-jának volt az egyik feladata, így a szimuláció peremfeltételei a feladatkiírásnak megfelelően kerültek meghatározásra.



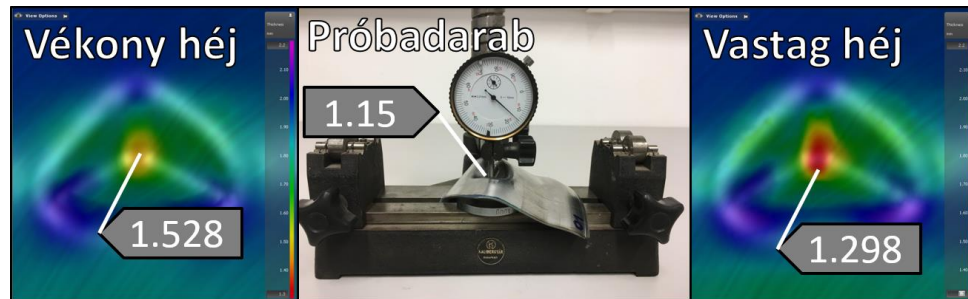
3. ábra. a.) A kritikus terület alakváltozása b.) NUMISHEET alkatrész szerszámozása

A 2. ábra szimulációjához vékony-héj hálóelemet alkalmaztak. Ez a hálóelem alapvetően nem veszi figyelembe a vastagság irányú nyomófeszültség hatását, amely ebben az ismertett alakváltozási esetben megjelenik. A cél tehát az volt, hogy megvizsgáljuk, hogy az egyes hálóelemek hogyan képezik le a lokális elvékonyodást. Három hálóelem típust vizsgáltunk, két különböző végeleemes modellező szoftverben. A vékony, illetve vastag héjelemmel végzett szimulációkat az AutoForm R8 piacvezető autóiipari lemezalakítási szimulációkra fejlesztett szoftverben, a nyolc csomópontú téglatest elemmel végzett szimulációkat a DEFORM térfogatalakítási problémákra fejlesztett szoftverben oldottuk meg.



4. ábra. Lokális elvékonyodás összehasonlítása eltérő hálóelemek esetén

A 4. ábra szemlélteti a lemezalkatrész szimulációinak eredményeit a lemezvastagság és ívhossz összefüggésében a három eltérő hálóelem esetén. A fizikai méréseket tükröző elvékonyodás a téglatest hálóelemnél jött létre, viszont ehhez az elemhez tartozott a leghosszabb számítási idő. A legrövidebb számítási időt adó vékony héjelem esetén a kritikus területen a kontrakcióhoz tartozó alakváltozás nagyobb ívhosszon oszlik el, amely megmagyarázza a 2. ábrán bemutatott nagy eltérést a fizikai alkatrész, illetve a szimuláció között. A vastaghéjelemmel végzett szimuláció eredményei megközelítik a téglatest hálóelem eredményeit, a számítási idő azonban a vékony héjelemével volt összevethető.



5. ábra. Vékony és vastag héjelem szimulációinak összehasonlítása a fizikai darabbal

Az 5. ábrán a 2. ábránál ismertetett alkatrész kritikus részét vetettük össze különböző hálóelemek alkalmazása mellett. Az alkatrész bonyolultsága és méretei olyan számítási igényrel járnak téglatest elem esetén, amelynek kivitelezésére nem volt lehetőségünk. Az 5. ábra alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy bár a vastag héjelem alkalmazása a vékonyhoz képest nagyobb számítási időt jelent, bonyolult geometria, illetve összetett alakítás esetén pontosabb képet kapunk vele a várható elvékonyodásról.

## 5. Összefoglalás

A cikkben rövid áttekintést tettünk a nagyszilárdságú acél és alumínium ötvözeteken végzett hőhatás-övezeti szimulációk eredményeiről. A hegesztést követő utóhőkezelések (nagyszilárdságú acélok esetén megeresztés, alumínium ötvözetek esetén pedig mesterséges öregítés) alkalmazásával a hőhatás-övezet mechanikai tulajdonságai jelentős mértékben javíthatók, amelyet a DP acélok esetén lézersugaras hegesztési és utóhőkezelési kísérletekkel is igazoltunk. Az autóiipari lemezalkatrészek alakítástechnológiájának számítógépes modellezése szempontjából két releváns szoftver számítási eredményeit hasonlítottuk össze. Az eredmények alapján a vastag héjelem alkalmazása a vékonyhoz képest nagyobb számítási időt jelentett, ugyanakkor bonyolult geometria, illetve összetett alakítás esetén pontosabb képet kapunk vele az alkatrész várható elvékonyodásáról.

## 6. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. A lézersugaras hegesztési kísérletek feltételeinek biztosításáért köszönet illeti a Budai Benefit (BuBenLaser) Kft-t.

## Irodalom

- [1] Tisza, M., Kocsisné, B. M., Török, I.: *Innovatív anyagtechnológiák*, Gép, 63 (1), 2012. pp. 3-8.
- [2] Balogh A., Dobosy, Á., Frigyik, G., Gáspár, M., Kuzsella, L., Lukács, J., Meilinger, Á., Nagy, Gy., Pósalaky, D., Prém, L., Török I.: *Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai. Kutatások járműipari acél és alumínium ötvözet anyagokon*. Miskolci Egyetem, Miskolc, 2015. pp. 208. ISBN 978 963 358 081 3

- [3] Budai, D., Danyi, J.; Gál, G., Hegedűs, Gy., Kiss, A., Kovács, P. Z., Lukács, Zs., Marosné, Berkes M., Tisza, M.: *Képlékenyalakítás a járműiparban*. Miskolci Egyetem, Miskolc, 2015. pp. 208. ISBN: 978 963 358 082 0
- [4] Németh A., Dobosy Á., Török I.: *Különböző alumínium ötvözetek ellenállás-ponthegesztett kötéseinek elemzése*, Multidiszciplináris tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, 9 (4), 2019. pp. 167-181. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.14>
- [5] Jónás, Sz., Kovács, P. Z., Tisza, M.: *Klincks kötések vizsgálata*, Multidiszciplináris tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye, 9 (4), 2019. pp. 115-124. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.9>
- [6] Lukács J., Mobark H. F. H., Dobosy Á.: *High Cycle Fatigue Resistance of 700 MPa and 960 MPa Strength Categories High Strength Steels and Their Gas Metal Arc Welded Joints*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. pp. 539-555. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5\\_47](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_47)
- [7] Koncsik, Zs.: *Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches*, Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development (ICESSD 2019), 2019. pp. 316-324., <https://doi.org/10.1201/9780367824037-38>