



MISKOLCI
EGYETEM

Kutatási eredmények

a

Miskolci Egyetem

Gépészmérnöki és Informatikai Karának

**Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai
Intézetében**

2024





MISKOLCI
EGYETEM

Kutatási eredmények
a
Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Karának
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai
Intézetében
2024

Szerkesztette:
Kovács Judit – Lukács János

Miskolc, 2024

**Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai
Karának Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében
2024**

Szerkesztette:

Dr. Kovács Judit – Dr. Lukács János

© Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad, Bencs Péter, Jemal Ebrahim Dessie,
Fodorné Cserépi Mariann, Gál Gaszton György, Gáspár Marcell,
Gyura László, Hareancz Ferenc, Kocsisné Baán Mária, Kolozsváry Zoltán,
Kovács Judit, Kovács Péter Zoltán, Kuzsella László, Lukács János, Lukács Zsolt,
Meilinger Ákos, Nagy Nóra, Sas Illés, Abdulhakim Shukurea,
Raghawendra Pratap Singh Sisodia, Tajti Ferenc, Terdik Gábor

Kiadó:

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar,
Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet

A kiadásért felelős:

Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens, intézetigazgató

Miskolc, 2024

ISBN 978-963-358-346-3

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	3
<i>Table of Contents</i>	
Előszó	7
<i>Foreword</i>	
Lukács Zsolt	
A mérnökképzés korszerűsítésének tartalmi és módszertani megfontolásai.....	9
<i>Considerations on the Content and the Methodology of Modernising Engineering Education</i>	
Kolozsváry Zoltán, Gáspár Marcell és Kocsisné Baán Mária	
Hidrogén bekeverés hatása a földgáz rendszerek integritására.....	27
<i>Impact of Hydrogen Blending on the Integrity of Natural Gas Systems</i>	
Nagy Nóra és Bencs Péter	
Alumíniumötvözetek klincs kötéseinek mechanikai vizsgálatai és nagyciklusú fárasztóvizsgálata.....	37
<i>Mechanical Testings and High Cycle Fatigue Testing of Clinched Joints on Aluminium Alloys</i>	
Kovács Péter Zoltán, Lukács János és Abdulhakim Shukurea	
Finomlemezek egytengelyű ciklikus húzó-nyomó vizsgálatára alkalmas mérőkészülék tervezése.....	51
<i>Design of a Measuring Device for the Uniaxial Cyclic Tension-compression Test of Strips</i>	
Lukács Zsolt, Gál Gaszton György és Jemal Ebrahim Dessie	
Kovácsolt darab vizsgálata végeselemes szoftver segítségével.....	61
<i>Investigation of Forged Product Applying Finite Element Software</i>	
Kovács Péter Zoltán	
Nagyszilárdságú acél alapanyagokon végzett felrakóhegesztések dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállása.....	73
<i>Resistance to Dynamic Loading of Hardfacing on High Strength Steel Substrates</i>	
Terdik Gábor és Meilinger Ákos	
Az impulzustechnika hatása az MS1400 alapanyagokon végzett ellenállás-ponthegesztett kötések szövetszerkezetére.....	85
<i>The Effect of Pulse Technique on the Microstructure of Resistance Spot Welded Joints on MS1400 Steel</i>	
Sahm Alden Abd Al Anis Mohammad és Meilinger Ákos	

Ellenállás-ponthegesztési paraméterek hatása az alumínium – acél vegyes kötések tulajdonságaira.....	95
<i>Effect of Resistance Spot Welding Parameters on the Properties of Aluminium-steel Hybrid Joints</i>	
Fodorné Cserépi Mariann és Meilinger Ákos	
Martenzites és kettős-fázisú acéllemezek ellenállás-ponthegesztett kötéseinek nagy ciklusú fárasztóvizsgálatai.....	107
<i>High-cycle Fatigue Tests on Resistance Spot Welded Joints of Martensitic and Dual-phase Steel Sheets</i>	
Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad, Meilinger Ákos, Gáspár Marcell és Lukács János	
Lángegyengetési hőciklusok hatása az S1100M acél tulajdonságaira.....	119
<i>Effect of Flame Straightening Thermal Cycles on the Properties of S1100M Steel</i>	
Gáspár Marcell, Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad és Gyura László	
Thermal Simulation of Resistance Spot Welding in Case of DP600 Steel.....	131
<i>Az ellenállás-ponthegesztés termikus szimulációja DP600 acél esetében</i>	
Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad és Meilinger Ákos	
A Brief Review of the Recent Advances in Novel Laser Welding Technologies.....	143
<i>A korszerű lézerhegesztési technológiák legújabb fejlesztéseinek rövid áttekintése</i>	
Raghawendra Pratap Singh Sisodia	
Comparative Analysis of Normal and Oscillation Laser Beam Welding of 1400M Steel.....	153
<i>Az 1400M jelű acél normál és oszcillációs lézersugaras hegesztésének összehasonlító elemzése</i>	
Raghawendra Pratap Singh Sisodia, Hareancz Ferenc és Tajti Ferenc	
Polimeradalékolt vízbázisú hűtőközegek hűtési erélyességének vizsgálata a koncentráció függvényében.....	167
<i>Study of the Cooling Performance of Polymer-doped Water-based Coolants as a Function of Concentration</i>	
Kuzsella László	
A hozaganyag és a fáradásos repedésterjedési viselkedés kapcsolata nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztett kötéseinél.....	177
<i>Relationship between Filler Metals and Fatigue Crack Propagation Behaviour in Welded Joints of High Strength Structural Steels</i>	
Kovács Judit és Lukács János	

A 960 MPa szilárdsági kategóriájú szerkezeti acélok és hegesztett kötéseik nagyciklusú fáradását befolyásoló tényezők.....	189
<i>Factors Affecting the High Cycle Fatigue of 960 MPa Structural Steels and their Welded Joints</i>	
Sas Illés és Lukács János	
Hidrogénnek kitett X42, X52 és X100 anyagú csővezetékek körvarratainak integritását befolyásoló tényezők.....	203
<i>Factors Affecting the Integrity of the Girth Welds of Pipelines Made of X42, X52 and X100 Materials Exposed to Hydrogen</i>	
Kovács Judit és Lukács János	
Hidrogénnek kitett csőtávvezeték-szakaszok értékelése full-scale tesztek alapján.....	225
<i>Evaluation of pipeline sections exposed to hydrogen based on full-scale tests</i>	
Nagy Nóra és Lukács János	
A. Függelék – A 2024-as esztendő legfontosabb intézeti és Intézethez kötődő eseményei	237
<i>Appendix A – Key Institute and Institute-Related Events in 2024</i>	
B. Függelék – A COVE-WENDT és a HINTS projektek.....	249
<i>Appendix B – The COVE-WENDT and the HINTS projects</i>	
C. Függelék – Prof. Dr. Tisza Miklós mellszobrának avatása a Miskolci Egyetem főépületének régi aulájában.....	257
<i>Appendix B – Inauguration of the Bust of Prof. Dr. Miklós Tisza in the Old Lobby of the Main Building of the University of Miskolc</i>	
D. Függelék – A Nippon Steel vállalat képviselőinek látogatása az Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézetben.....	265
<i>Appendix B – Visit of Nippon Steel Representatives at the Institute of Materials Science and Technology</i>	
E. Függelék – 75 éves a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kara – Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Szekció.....	269
<i>Appendix B – 75th Anniversary of the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics of the University of Miskolc – Materials Science and Materials Technology Section</i>	

AZ ÉVKÖNYV MEGJELÉNÉSÉNEK TÁMOGATÓI

Linde Gáz Magyarország Zrt.



<https://www.lindegas.hu/shop/hu/hu-ig/home>

SYRIUS-TECH Kft.



<https://syrius.hu/>

ELŐSZÓ

A 2024-es évvel megszületett a 2022-ben életre hívott intézeti Évkönyvünk harmadik kiadása. Ezzel ismét lezárunk egy évet az Intézet történelmében. Ez az év is, mint az előző évek, a sok bizonytalanság és a kihívások mellett tartogatott szép számmal, mind egyéni, mind közösségi sikereket. Bízom benne, hogy az erőfeszítések, mind egyéni, mind közösségi értelemben erősebbé tettek minket és szeretnék bízni abban is, hogy – a nagy évvégi hajtást az ünnepek alatt családi körben kipihelve – utólag mindenki sikeresen értékelheti az elmúlt 2024-es évet.

A sikerek eléréséhez az adott lehetőségek felismerése mellett azonban kitartó és fáradhatatlan munka által vezet az út. Visszagondolva, sok hétvégét loptunk el a szeretteinktől egy-egy nagyobb projektmérföldkő, beszámoló vagy publikációs kihívás teljesítése miatt. Bízni szeretnék benne, hogy nem haszontalanul.

Amikor az ember benne van a sűrűjében, talán nem is érzi át, hogy egy adott nap kihívását letudva valójában ő is egy kicsit hozzá tett az Intézet történetéhez. A 2024-es évet összegző eseménynapló áttekintése után gondoltam bele, hogy egy nagyobb rendezvény, egy külföldi delegáció látogatása a mindennapokban talán nem tekinthető át annyira tisztán, mint így az év végén összegezve, és talán az akkor megoldandó kihívásnak tekintett esemény valójában egy sikeres továbblépés az Intézet szakmai kapcsolati hálózatának építésében. Mivel ezek a kapcsolatok életben tartása és újak építése alapozza meg azt, hogy gyümölcsöző együttműködések jöjjenek létre.

A 2024-es évben több hosszútávú és nagy lélegzetvételű projekt futott párhuzamosan, lehetőséget adva az intézeti kollektíva minden egyes tagjának bekapcsolódni, talán a komfort zónáján kívüli szakmai tevékenységekbe is. Az évkönyvben összegyűjtött szakmai cikkek szerzői között találok olyan kollégákat, akikről régebben nem feltétlen gondoltam, hogy ebben a szakmai irányban is fognak tevékenykedni. Vezetőként ez pozitív érzésekkel tölt el, hiszen az ismeretanyagunk bővítése a személyes kompetenciáink fejlesztése a munkánkból adódóan mind személyes, mind közösségi érdekünk.

A szakmai tevékenységek mellett a 2024-es év az alaptevékenységünk az oktatás területén is okozott kihívásokat. A mostani hallgatói generáció tanulási motivációja és gyakorlata messze került az általunk folytatott gyakorlattól. Az ehhez történő alkalmazkodás egyéni és intézeti szinten is komoly kihívásnak tekinthető. Sokan éljük meg kudarcként egy rosszul sikerült évfolyam zárthelyi után a munkánk sikertelenségét. Mindenki ott motoszkál a jól csinálom-e, min célszerű változtatnom, hogy eredményesebb legyen az oktatási folyamat. Igen, sok minden megváltozott, de aki a változással nem halad bezárhatja magát egy olyan toronyba, amelyben már csak ő lakik.

Ezért új módszereket és új folyamatokat próbálunk ki, amelyek egy folyamatos megújulást várnak el minden kollégámtól. Ebben az Intézet kollektívája nyitott. A közösen eltöltött időben próbáltuk megosztani egymással a jó gyakorlatokat, a sikertelen próbálkozásokat, bízva abban, hogy megtaláljuk az utat a tudásanyag következő generációba történő átmentésére. Nem mondhatom, hogy már megvan a megoldás, de nem is adjuk fel annak megtalálását.

A 2024-es év szép számmal hozott olyan egyéni sikereket, amelyekkel a közösségünk is erősebbé válhat. Sikeres doktori védés, sikeres komplex vizsgák mutatják, hogy élő és megújuló közösségként tettük a dolgunkat ebben az évben is. Voltak kollégáink, akik hosszú munka eredményeként tudományos fokozatban, egyetemi beosztásban tudtak előre lépni. Voltak az életüket máshol elképzelő egyéni döntések is. Az életüket máshol elképzelő kollégáknak sikeres további karriert kívánunk és

titkon bízunk abban, hogy világlátott emberként esetleg egyszer visszatérve, megosztják velünk tapasztalataikat, amelyekkel mi is egy kicsit többek lehetünk.

Az előszó lezárása előtt ilyen formában is szeretném megköszönni minden egyes kollégámnak ebben a hosszúnak tűnő évben is a munkáját. Bizom benne, hogy az utánunk jövők a 2024-es intézeti Évkönyvet forgatva elismeréssel gondolnak majd mindannyiunkra, látva, hogy amikor nekünk kellett tenni a dolgunkat, akkor elődeink példáját követve mi is megtettük azt.

Végezetül, szeretnék köszönetet mondani minden cikkel az Évkönyvbe jelentkező kollégámnak, akik a 2024-ben folytatott sokszínű és értékes szakmai munkájukat bemutatták. Így, az idei, a 2024-es évkönyvük szakmai színvonalában, követve az előző évben megjelent évkönyveinket az Anyag-szerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet hagyományaihoz méltó kiadványt tud ismét megjelentetni.

Külön, és név szerint szeretnék köszönetet mondani Prof. Dr. Lukács Jánosnak és Dr. Kovács Juditnak, hogy a szakmai lektorálás és az egységes formátumra szerkesztés sokszor hálátlan feladatát magukra vállalták.

Miskolc, 2024. december 15.

Dr. Lukács Zsolt
egyetemi docens, intézetigazgató

A MÉRNÖKKÉPZÉS KORSZERŰSÍTÉSÉNEK TARTALMI ÉS MÓDSZERTANI MEGFONTOLÁSAI

Kolozsváry Zoltán

Egyetemi tanár, ny. igazgató,
Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Plasmaterm SA, Marosvásárhely,
400112 Cluj-Napoca (Kolozsvár) str. Matei Corvin (Mátyás király u.) nr. 4, Románia,
540390 Târgu Mureş, Strada Budiului 66A, Románia
email: zoltan.kolozsvary@plasmaterm.ro

Gáspár Marcell

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: marcell.gaspar@uni-miskolc.hu

Kocsisné Baán Mária

Ny. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: m.kocsis.baan@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A mérnökképzés minőségének és hatékonyságának folyamatos megújulása elengedhetetlen feltétele az ambiciózus nemzetgazdasági elképzelések, tervek megvalósításának. A digitalizáció – mint annyi más területen – ebben a vonatkozásban is rendkívüli lehetőségeket rejt magában, ha nem öncélú, és hektikus reformfolyamatokban és programokban ölt testet, hanem átgondolt, érdemi tartalmi és módszertani fejlesztések megvalósításában támogatja az elkötelezett oktatók, kutatók munkáját. A hatékonyabb, versenyképesebb ipari termelés érdekében a folyamatok digitalizációja és optimalizációja csak abban az esetben képes hasznosulni, ha korszerű szemléletmóddal és megalapozott elméleti tudással rendelkező, ismereteik és kompetenciáik folyamatos megújítására, bővítésére képes mérnök-generációkat nevelünk.

Kulcsszavak: mérnökképzés, digitalizáció, módszertan, OCW, OER, MOOC

Abstract

The continuous renewal of the quality and efficiency of engineering education is a prerequisite for the realisation of our ambitious national economic visions and plans. Digitalisation - as in so many other fields - holds extraordinary opportunities in this respect, if it is not embodied in hectic reform processes and programmes but supports the work of our dedicated teachers and researchers in the implementation of well thought-out, meaningful content and methodological developments. The digitalisation and optimisation of production processes can only exploit the potential for more efficient and competitive industrial production if we educate generations of engineers with a modern approach and sound theoretical knowledge, capable of constantly renewing and expanding their knowledge and competencies.

Keywords: engineering education, digitalisation, methodology, OCW, OER, MOOC

1. Bevezetés

Aligha vonható kétségbe, hogy egy ország gazdasági teljesítményét és társadalmi fejlődését alapvetően meghatározza a felsőoktatás minősége, hatékonysága. Ennek felismerése tükröződik az időről időre megjelenő helyzetelemzésekben és stratégiai dokumentumokban [1] meghatározott célok kijelölésében, és az ezek eléréséhez szükséges folyamatok felvázolásában.

A felsőoktatáson belül is kiemelt figyelmet kell fordítani a műszaki felsőoktatás, a mérnökképzés – mint a negyedik ipari forradalom, azaz az Ipar 4.0 kulcsszereplőit kibocsátó képzőhelyek – minőségére és hatékonyságára. A STEM mozaikszóval (Science, Technology, Engineering and Mathematics) jellemzett tudományterületekre fókuszáló fokozott figyelem tükröződik számos hazai és nemzetközi kezdeményezés, program támogatottságában is [2], [3].

Mégis, a mérnökképzésben szerzett több évtizedes tapasztalatunk azt mutatja, hogy a változások üteme messze elmarad a kívánatos és szükséges fejlődési folyamatoktól, s nem egyszer azok iránya is céltévesztést mutat, a képzési programok koncepcionális felépítésében tetten érhető diszfunkcionalitást okoz. Jóllehet számos, a felsőoktatásban kritizálható helyzet és folyamat háttérében valós okként nevezhető meg a több évtizedes alulfinanszírozottság, rövid tanulmányunkban azonban mi nem ezekre a jelentős erőforrásokat, és átfogó, rendszerszintű beavatkozásokat igénylő javaslatokra szeretnénk összpontosítani, hanem pragmatikusan kívánjuk megközelíteni azt a kérdést, hogy mit tehetünk mi magunk a képzési programok színvonalának és hatékonyságának fokozásáért. Javaslatainkkal az oktatók-kutatók és az ipari szakemberek szakmai közösségeinek együtt-gondolkodása és együtt-működése terén eddig nem kellően kiaknázott lehetőségeket kívánunk körvonalazni.

2. A mérnökképzés megújításának tartalmi, koncepcionális kérdései

A mérnökképzés strukturális felépítését illetően fontos szempontnak tartjuk, hogy egy szűk szakterületre vonatkozó specializált mérnöki tudás helyett elsősorban a mérnöki szemléletmód és gondolkodásmód kialakítását kell az oktatásnak támogatnia. Mérnöki pályafutásunk egészében a hőkezelés és a felületkezelés területére koncentráltunk, így szemléltetésül ennek megfelelő példákat szeretnénk felhozni. Köztudott, hogy a 21. század látványos fejlődése jelentős mértékben köszönhető az anyagtudomány fejlődésének és az anyagtudománnyal kapcsolatos új területek térhódításának. Ide tartozik elsősorban az info-anyagok fejlődése, a nano-anyagokkal és – nem utolsósorban – a bioanyagokkal kapcsolatos felismerések, amelyek ugyan még eléggé „gyerekcipőben” járnak, de jelentőségük nem kérdőjelezhető meg, különösen, ha a klímavédelem és biodiverzitás fenntartását tartjuk szem előtt. Szűkebb szakterületünk sikeres művelése elképzelhetetlen lenne számunkra, ha nem lenne megfelelő mélységű rálátásunk, kitekintésünk ennek a szélesebb szakmai területnek a fejlődésére. Még tovább gondolva, elengedhetetlenül fontosnak tartjuk a mérnöki ismeretek szilárd természettudományos megalapozását. Ennek – tapasztalataink szerint – ellene hat a korunkban oly nagy jelentőségű digitális világ térhódítása, amely minden tárgykörben hatalmas haladást mutat. Nem szabad azonban elfeledkeznünk arról sem, hogy a legmodernebb számítástechnika sem helyettesítheti az alapismeretek megfelelő mélységű elsajátítását. Úgy tűnik, ez a tárgykör a legelhanyagoltabb és a fiatalok között egy olyan szemlélet kezd mind jobban teret hódítani, hogy a számítógép mindent megold, egyébre nincs is szükség, avagy a robotok – s újabban a mesterséges intelligencia – minden feladatot kifogástalanul elvégeznek, megoldanak, személyes közreműködés nélkül. Itt látjuk az oktatás egyik legérzékenyebb pontját, mert a digitális ismeretek nem helyettesíthetik az alapismereteket, csak azokra alapozva kiegészíthetik őket. Más szóval, először hangsúlyt kell fektetnünk az oktatásban az

alapismeretek elsajátítására, majd azokat továbbfejlesztve alkalmazzuk a digitális rendszerek által felkínált lehetőségeket, a pontosabb és gyorsabb megoldások elérése érdekében.

A képzési programok túlzott és túl korai specializációjának irányába hat az is, hogy az ipar részéről megfogalmazott képzési igények tekintetében a multinacionális nagyvállalatok – akiknek egy-egy szűkebb szakterületre felkészített, azonnal alkalmazható mérnöki tudással rendelkező szakemberekre van szükségük – jobb érdekérvényesítő erővel bírnak, mint a sokoldalú, innovatív mérnöki gondolkodásra képes mérnököket igénylő kis- és középvállalkozói szektor [4].

A mérnöki kreativitásra, innovációra irányuló mérnökképzésben igen nagy fontossággal bír a kritikus gondolkodás, a „miért” kérdések sorozata [5]. Ez talán kevésbé közérthető, mint az előbbi, de a látványos újítások mindig a „miért”-ből indulnak ki, azaz szeretnénk valamit jobban, gyorsabban, megbízhatóbban megoldani és ehhez időnként „forradalmian” új megoldások szükségesek. A mintegy négy évtizedes egyetemi oktatói pályánk folyamán ezek a kérdések igen gyakran kerültek elénk és időre volt szükség, mire mindennek jelentőségét és lényegét felfogtuk.

Egyetlen példát idéznénk, egyikünk (K. Z.) személyes élettapasztalata révén, szakmai alaptevékenységének a területéről: egész pályafutásom alatt a hőkezelés és a felületkezelés területével, főleg a nitrogén-hatás tanulmányozásával foglalkoztam. 1963-ban kaptam a feladatot, hogy tervezzek és építsek egy nitridáló kemencét a körkötőgépek munkahengereinek kezelésére. Igen nagy lendülettel láttam a feladatnak, de a rendelkezésemre álló anyagok nem mindig voltak a legalkalmasabbak. Így történt, hogy nem sikerült teljesen kizárnom a levegőt a kemencéből, de az eredmények meglepő módon a vártnál jobbak lettek. Egy rövid közleményt írtam, amely a véletlen folytán egy igen neves – a szakmában világszerte elismert – professzor kezébe jutott, aki írt nekem egy levelet, méltatva az észrevétel jelentőségét és biztatva, hogy folytassam ezt a munkát, mert új utakra vezethet. Ez volt az a momentum, amely a későbbiekre meghatározta életpályámat. Számomra ez volt az a pillanat, amikor a „miért” sorsdöntőnek bizonyult.

A mérnökképzés mindezen aspektusokat figyelembe kell, hogy vegye, mert a mérnöki munka igen sokoldalú és nyitott kell legyen az újításokra és a megszokottól való eltérésekre.

A mérnöki szemléletmód és gondolkodás kifejlesztésében nagy jelentősége van az oktatók és hallgatók személyes munkakapcsolatának, s itt feltétlenül meg kell említenünk a járványhelyzettel kapcsolatos tapasztalatokat, azaz az on-line oktatással kapcsolatos kérdéseket. Lehet, hogy megközelítésünk kissé „régimódi” de úgy gondoljuk, hogy az on-line oktatás csak kiegészítheti és magasabb szintre emelheti a személyes, közvetlen oktatás „tudás-átadását.” Hisszük és valljuk, hogy az egyetemi oktatásban is először hangsúlyt kell fektetni a jelenségek és az alpműveletek megismertetésére és második lépésként térhetünk át a digitalizáció kínálta lehetőségek kifejtésére. Ez a kérdéskör számtalan vitát eredményez, de el kell ismernünk, hogy a betűk és a számok ismerete nélkül nem tudunk szövegeket szerkeszteni. Lehet, hogy ez így kissé „durván” hangzik, de vitathatatlanul az alapigazságok része.

3. A mérnökképzés módszertani korszerűsítése

Az ismeretátadás és tudás-generálás hatékonyságának növelése érdekében a felsőoktatás pedagógiai, módszertani megújításának szükségessége már több évtizede napirenden lévő téma, a régóta várt paradigmaváltás azonban még mindig várat magára. Az élethosszig tartó tanulás jelentőségének felismerésével kiemelt figyelem irányult a távoktatás fejlesztésére, a részidős, „második esélyt” kínáló képzési programok minőségi színvonalának emelése céljával. Kezdetben azonban a speciális, tanulás-központú módszertanra épülő tananyagcsomagok fejlesztése rendkívül költséges volt, és csak jelentős

hallgatói létszámok esetén volt vállalható befektetés – elég, ha példaként a brit Open University kurzusaiban a BBC által gyártott és sugárzott videófilmek költség-igényére gondolunk. Úgy tűnt, az internet és az e-learning megjelenése a módszertani fejlesztés szükségessége mellé annak költség-hatékony lehetőségét is megteremti, különösképpen az ingyenes keretrendszerek, platformok (moodle, ilias) elterjedésével és a felhasználóbarát, ingyenes fejlesztő programok sokasodásával. Ennek ellenére az igazi áttörés továbbra is elmaradt, s egyre kevésbé lehet ezt az infrastrukturális hiányosságokra, az elérhetőség intézményi, vagy a hallgatói oldalon jelentkező nehézségeire, vagy az érintettek IKT kompetenciáinak hiányára fogni.

Már a 90-es évek közepétől számos EU által finanszírozott program támogatta a korszerű módszertant alkalmazó tananyagfejlesztést (TEMPUS, Minerva, Leonardo, e-Learning, Erasmus, LifeLongLearning), amelyek keretében magyar szakemberek és intézmények is megismerhették és alkalmazhatták, továbbfejleszthették a legkorszerűbb oktatási módszereket [6], [7]. A digitalizációban rejlő lehetőségek oktatási alkalmazásában világszerte a felsőoktatásban jelentek meg elsőként az innovatív módszerek és megoldások – ezzel szemben hazánkban a Sulinet program a közoktatás és szakképzés területén ért el kimagasló eredményeket, és nem állt meg az infrastrukturális fejlesztéseknél, hanem jelentős tartalomszolgáltatói szerepet is vállalt – megújult formában ma is színvonalasan működik [8]. A hazai programok közül a 2000-es évek elején az Apertus pályázatai – amelyek valamennyi képzési szintre és szektorra, így a felsőoktatásra is nyitottak voltak – még jelentős figyelmet fordítottak a módszertani kérdésekre és az elkészült tananyagok egységes szempontrendszer szerinti minősítésére, a rendszeres tapasztalatcserére. A későbbiekben azonban egyre inkább integrált, robusztus intézményi pályázatok keretében valósulhattak meg tananyag-fejlesztések, amelyekben egyre kevésbé érvényesültek a módszertani szempontok. Voltak ugyan próbálkozások például arra, hogy a tananyagfejlesztők kötelezően vegyenek részt módszertani felkészítő tréningen, ezek minősége azonban sok esetben megkérdőjelezhető, a részvétel pedig névleges volt. Következésképpen, digitális formában (is) elérhető, hagyományos tankönyvek sokaságának fejlesztésére emésztődtek fel az erőforrások.

A programok hatékonyságát, az eredmények fenntarthatóságát illetően szintén rendkívül kedvezőtlenek a tapasztalatok: a kidolgozott tananyagok online változatát jellemzően még a tananyagfejlesztők sem alkalmazzák oktatási gyakorlatukban, arra pedig még konzorciumi fejlesztésű projekt esetén is alig van példa, hogy a partner intézmények egymás tananyagait használják.

Történtek pedig kezdeményezések ennek elősegítésére is, például a Digitális Tankönyvtár [9] létrehozásával, amelynek adatbázisába bizonyos hazai támogatású projektek keretében fejlesztett valamennyi digitális tananyagot kötelezően fel kellett tölteni. A döntően hagyományos tankönyvek pdf verzióit tartalmazó portálnak sajnálatosan még az újabb verziója is sok kívánnivalót hagy maga után, színvonalában messze elmarad a közoktatás és szakképzés Sulinet Digitális Tudásbázisától. A szabványos e-learning formátumnak tekinthető SCORM tananyagelemeket például nem tudja megjeleníteni, csak letöltési lehetőséget kínál fel a rendszer. A kereshetőség szempontjából pedig mind a tárgyszó szerinti keresés, mind a szerzők nevére történő keresésnél primitív hibák sokaságával találkozhatunk.

Az ezredforduló idején a digitális tartalmak online megjelenítésének térnyerésével párhuzamosan egy új szemléletmód kialakulásának, az oktatási tartalmak „open” elérhetőségét szorgalmazó mozgalmak megjelenésének lehettünk tanúi, azzal a szándékkal, hogy a tudáshoz való szabad hozzáférést és az erőforrások használatát minél kevesebb technikai, jogi vagy anyagi jellegű korlátozás akadályozza. [10, 11]

Amíg a digitális tananyag-tartalmakat CD-ROM formájában terjesztették, a tananyagfejlesztés jellemzően magas költségeit nyilvánvalóan a felhasználók fizették meg, így az csak a népszerű témákban (nyelvtanulás, informatika) volt nyereségesnek tekinthető. Az online terjesztés mindnapossá válásával a tartalomhoz való hozzáférés technikailag sokkal egyszerűbbé és gyorsabbá vált, de a fejlesztési költségek megtérülése érdekében a fejlesztők jelszavakkal korlátozták a hozzáférést, és fizetősé tették az oktatási tartalmakat. A WEB 2.0 koncepció azonban egyre több olyan tartalomfejlesztő megjelenését eredményezte, akik nem kereskedelmi alapon fejlesztettek oktatási tartalmakat, így jelszóvédelem nélkül, ingyenesen elérhetővé tették azokat – ami valódi áttörést eredményezett az online oktatás szélesebb körű elterjedésében. Ráadásul a tartalomfejlesztés eszközei és a tanulás-szervezési keretrendszerek is egyre hozzáférhetőbbé váltak.

3.1. Nyitott képzés – minden szinten szinte minden

Az "OPEN" mozgalmakhoz kapcsolódóan az oktatás terén három mozaikszót érdemes megjegyeznünk: OCW (*OpenCourseWare*), OER (*Open Educational Resources*) és MOOC (*Massive Open Online Course*).

Az OCW esetében a kurzus online tananyagát tették ingyenesen elérhetővé, amelyek az önálló tanuláshoz mindössze tananyagot szolgáltattak, míg a 2012-től megjelenő MOOC esetében működő, a tanulási folyamatot szervező valós kurzusok hallgatói lehetünk. A kezdeti, főként a sajtó által túldimenzionált, irreális várakozások az oktatás széleskörű demokratizálásáról szóltak, azt vizionálva, hogy a felsőfokú oktatásból eddig kimaradt jelentős tömegek juthatnak ezek segítségével diplomához, és a felsőoktatás intézményi rendszerei akár feleslegessé is válhatnak.

Természetesen, hamar kiderült, hogy megfelelő finanszírozási háttér nélkül a MOOC portálok és rendszerek nem működtethetők, s mára változatos üzleti modellek alakultak ki, sok esetben több opciót kínálva a tanulni vágyóknak:

- rövid kurzusok ingyensen, *Certificate* nélkül, vagy
- opcionálisan fizethetünk az oklevélért, illetve
- fizetős, hosszabb tanulmányi periódusok és képzési programok.

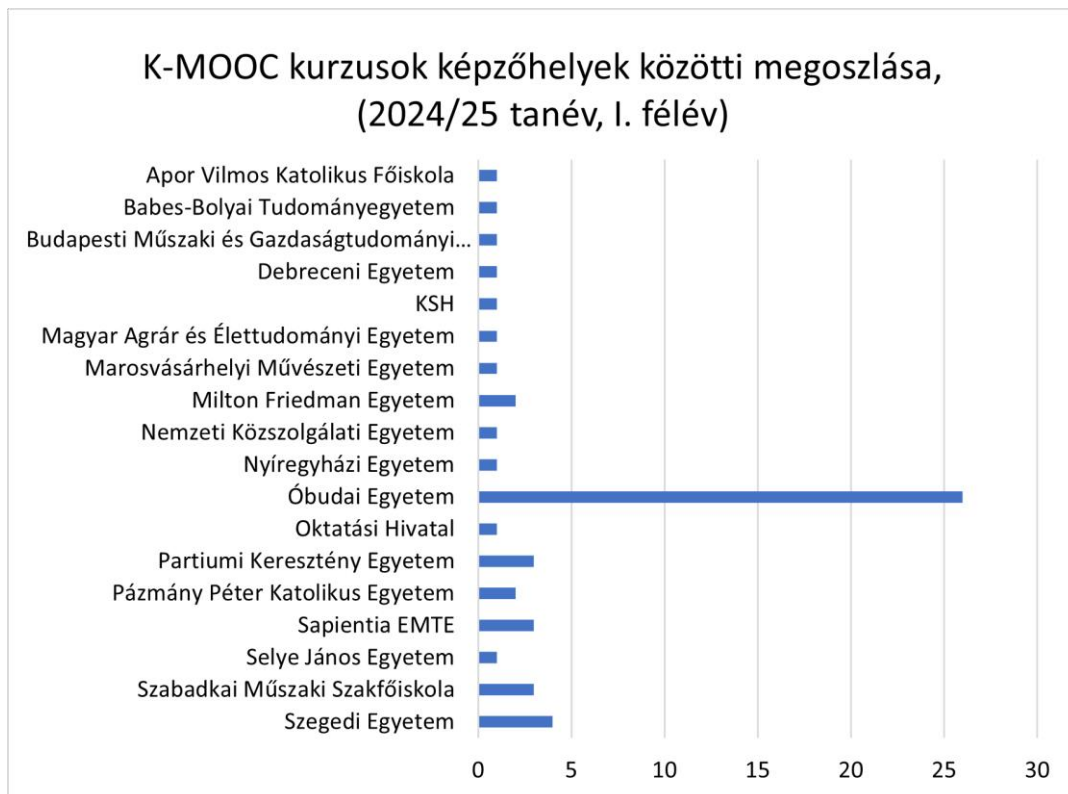
Az irreális várakozások lecsengése után a MOOC portálok kurzuskínálata és látogatottsága folyamatosan bővült, kiváló lehetőséget nyújtva döntően a már végzettséget szerzett szakemberek önálló tanulási formában való továbbképzésére, korszerű témakörökben tudásuk elmélyítésére, aktualizálására és kiegészítésére – mégpedig alapvetően neves képzőhelyek, egyetemek oktatási programjaival. Már alig egy évtizeddel az első MOOC kurzusok meghirdetése után, a statisztikák igen jelentős fejlődést mutattak, s mára a legismertebb MOOC portálok kínálatát egyesítve közel kétezer témakörben, mintegy 200 ezer kurzus közül választhatnak az érdeklődők, felhasználóbarát keresőmotorral kiválasztva nemcsak a témaköröket, a képzési szinteket és a képzőhelyeket, hanem a különböző nyelveket, a különböző időtartamú és szintű ingyenes kurzusokat is [12]. Az érdeklődők számára igen hasznos információkat kínálnak a különböző top-listák (évenként összeállított *Best Online Courses* listák, *The Best Free Online Courses of All Time*), és a különböző elemzések, statisztikák.

A MOOC kínálatot elemezve [12], a kurzusok számát illetően a 20 legjelentősebb intézmény adataiból az derül ki, hogy a kínálat 65%-a az USA intézményeiből, 25% különböző indiai egyetemekről, és csak 10 %-a érkezik Európából. A brit Open University ezer feletti kurzussal a második a 2000 feletti kurzust kínáló Stanford Egyetem mögött, fontos azonban megjegyeznünk, hogy a kurzusok számosságát elemző statisztikákban az alig egy-két órás kurzusok és a teljes szemeszteres,

akár diplomához is vezető kurzusok azonos megítélés alá esnek. A látogatottsági statisztikákat elemezve még inkább erős az USA egyetemeinek dominanciája.

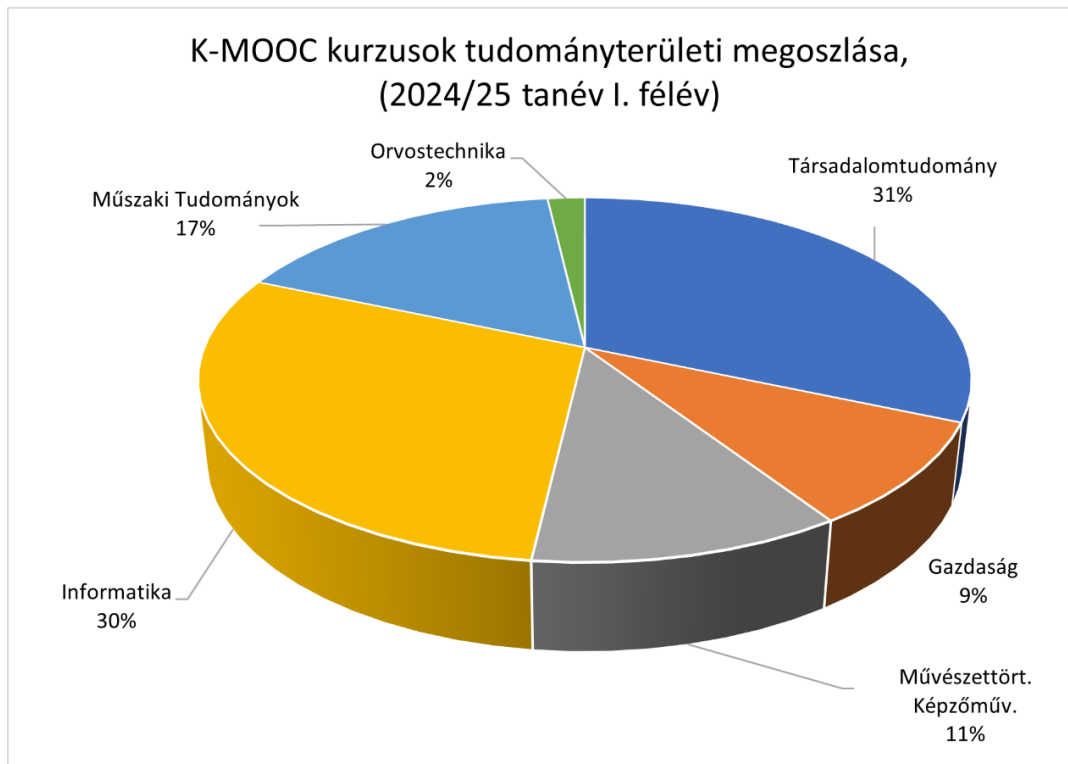
A MOOC kurzusok tematikáját illetően mind számosságukat, mind látogatottságukat tekintve az informatika, programozás és a gazdaságtudományok a listavezetők, a mérnöki szakterület kurzusai mindössze 7%-át teszik ki a képzési kínálatnak.

A hazai kezdeményezések közül az Óbudai Egyetem által működtetett K-MOOC (Kárpát-medencei Online Oktatási Centrum) bizonyult sikeresnek és fenntarthatónak [13], a portál számos felsőoktatási intézmény magyar nyelvű akkreditált online kurzusait kínálja, szemeszterekhez kötötten, kredit-beszámítással, így az inkább egy Kárpát-medencei virtuális mobilitási programnak tekinthető. Sajnálatos módon az elmúlt évek tendenciáit figyelve ez a kezdeményezés is megtorpant, a képző intézmények – az Óbudai Egyetemet kivéve – csak egy-két kurzust kínálnak a hallgatóknak. A 2024/25. tanév I. félévében bárki számára ingyenesen elérhető kurzusok közül 49 magyarul, 4 angolul és egy kurzus magyar és angol nyelven egyaránt felvehető, ezek képzőhelyek szerinti megoszlását az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A K-MOOC kurzusok megoszlása a képzést kínáló intézmények szerint (saját ábra a [13] portál adatai alapján).

A kurzusok döntően a társadalomtudományok, illetve az informatika területére fókuszálnak, de a műszaki tudományok és a művészettörténet, képzőművészet is több kurzussal képviseltetve van a kínálatban, amelynek tudományterületek szerinti megoszlását a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. A K-MOOC kurzusok tudományterületek szerinti megoszlása (saját ábra a [13] portál adatai alapján).

Az OCW és a MOOC közvetlenül a potenciális hallgatókat/tanulókat célozza, így számukra elsősorban az önfejlesztő, önálló tanulás, döntően a továbbképzés szempontjából jelent lehetőséget, nem melleleg pedig a képző intézmények számára kiváló marketing eszköz. A formális felsőoktatási képzésekhez így legfeljebb mintaként szolgál, mivel a kurzusok/tananyagok részei többnyire szerzői jog által védettek, nem adaptálhatók szabadon a saját képzési programjainkba. Ezzel szemben az *OER (Open Educational Resources)* sokszínű képzés-támogató tartalom és eszköz elérhetőségét oly módon biztosítja, hogy az újrahasznosítás, adaptáció lehetőségét egyértelmű licenz-leírásokkal teszi rugalmassá és jogilag rendezetté. A legnagyobb, nemzetközi OER portál [14] sokrétű, összetett keresőjével adott témakörben különböző típusú, célú (például gyakorlati útmutató, feladat, előadás-vázlat, illusztráció, grafikon, multimédia, szimuláció, esettanulmány) és formátumú oktatási forrásanyagot találhatunk. Szerencsére a hallgatóink nyelvi felkészültsége egyre kevésbé jelent korlátot a döntően angol nyelvű oktatási anyagok képzési programba építésével. A portál nemcsak egy rendkívül gazdag tananyag-repozitórium, de nagy hangsúlyt helyez a közösségépítésre és további tananyagfejlesztők integrálására is, kiemelten fókuszálva a STEM tudományterületekre.

3.2. Digitális tartalmak az Anyagtudomány és az Anyagtechnológiák témaköreiben

Az eddig bemutatott MOOC és OER portálok mellett érdemes megemlíteni néhány, kifejezetten az anyagtudomány szakterületére specializálódott kurzus, illetve tananyag-repozitóriumot – amelyek nem

távoktatási intézményekhez kötődnek és általában nem érhető el a tematikailag sokszínű, közismert OER-portálokról.

3.2.1. Matter és Steeluniversity

Az 1993-ban indult *MATTER* projekt az Egyesült Királyság egyetemeinek anyagtudományi tanszékeiből álló non-profit konzorciumaként kívánta elősegíteni a számítógép-alapú tanulási (*CBL: Computer-Based Learning*) anyagok integrálását a mainstream oktatásba. A Liverpooli Egyetem által koordinált projekt első szakaszának eredményeként 1996-ban jelent meg az *Anyagtudomány CD-ROM*-on, amelyet a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén már azokban az években is alkalmaztunk az oktatásban. A következő fázisban a digitális tananyagok egyre bővülő körét már online módon tették hozzáférhetővé [15], így 1999-ben a *Corus*-szal (korábban *British Steel*-lel) és a Birminghami Egyetemmel együttműködve elkészült a *SteelMATTER*, majd 2001-ben az Európai Alumínium Szövetség részvételével az *aluMATTER*.

A kohászati, acélipari szakember-képzés jelentős visszaesését tapasztalva, 2002-ben a World Steel Association webalapú e-learning tananyagok fejlesztését kezdeményezte a Liverpooli Egyetem *MATTER* projektjével együttműködésben. A bevezető modulok sikerét látva a szakmai szervezet jelentős költségvetési támogatást biztosítva és nemzetközi együttműködésre építve folyamatosan bővítette gazdagon illusztrált tananyagait, a portál 2003 óta Steeluniversity [16] néven működik, mára azonban a képzések egy része már csak fizetősen érhető el.

3.2.2. DoITPoMS (University of Cambridge)

A *DoITPoMS (Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science)* [17] projekt 2000-ben jött létre, a Cambridge-i Egyetem Anyagtudományi és Metallurgiai Tanszékének irányításával, további öt neves angol partnerintézmény (Leeds, London, Manchester, Oxford, Sheffield) releváns tanszékeinek részvételével és az Egyesült Királyság Anyagtudományi Oktatási Központjával, valamint a *MATTER* projekttel együttműködésben. A projekt portálján egy-egy témakört tárgyaló, komplex tananyag-csomagok (*TLP: Teaching and Learning Packages*), és demonstrációs anyagok (*LDP: Lecture Demonstration Package*), azaz egy-egy előadáson belül végrehajtható rövid (~3-5 perces) gyakorlati bemutatók találhatók. Emellett nagy számban érhetünk el illusztrációs anyagokat – rövid videók, mikroszkópi felvételek, animációk – könnyen kereshető formában, saját oktatási gyakorlatunkba rugalmasan beilleszthető forrásanyagként. Valamennyi tananyag-egységhez egyértelmű, hasznos leírásokat adnak nemcsak tartalmi értelemben, de a technikai és jogi kérdéseket is körültekintően részletezve.

3.2.3. Digitális tananyagfejlesztés az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben

Az Intézetben, illetve annak jogelődjeként a Mechanikai Technológiai Tanszéken a kétezres évek elejétől számos, hazai és nemzetközi együttműködéssel megvalósult projekt keretében fejlesztettünk digitális tananyagokat, amelyekről rövid áttekintést ad az 1. táblázat, s amelyek eredményeit számos publikációban ismertettük [6], [7].

1. táblázat. Digitális tananyagfejlesztő projektek az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben, és jogelődjében, a Mechanikai Technológiai Tanszéken

Projekt címe	Megvalósulás időszaka	Program	Rövid leírás
<i>MODUL – Moduláris rendszerű virtuális gépészmérnökképzés</i>	2001-2002	Apertus Közalapítvány	Magyar nyelvű tananyag-modulok négy hazai műszaki felsőoktatási intézmény együttműködésében, e-learning keretrendszerben.
<i>ADVANCED ENGINEERING - Korszerű műszaki ismeretek angolul</i>	2002-2004	PHARE	300 órás angol nyelvű mérnöktovábbképző program kidolgozása és tesztelése, saját fejlesztésű és egyedi arculatú on-line megoldásokat kínáló képzési modulokkal, videó-konferencián keresztül több helyszínen.
<i>INNOV@TE – International On-Line Voc@tional Training in Surface Engineering</i>	2001-2004	EU Leonardo	Különböző képzési programokba integrálható, sokoldalúan használható, többnyelvű tananyag-elemek fejlesztése, változatos informatikai megoldásokkal, videó-előadásokkal – nemzetközi szakmai szervezetek (IOM3, IFHTSE) részvételével
<i>E2ENGINEERING – Development and testing of multilingual e-learning materials and courses in advanced engineering subjects</i>	2004-2006	EU Leonardo	Több szintű, többnyelvű, önálló képzési modulok fejlesztése a számítógéppel segített mérnöki feladatok különböző témaköreiben
<i>MinSE – European Master in Surface Engineering</i>	2006-2009	EU Erasmus	Mester szintű, nemzetközileg elismert, akkreditált képzési program kidolgozása és tesztelése, e-learning kiegészítő elemekkel támogatott blended learning formában – iparvállalatok és nemzetközi szakmai szervezetek (IFHTSE) részvételével, illetve akkreditációjával (IOM3).
<i>DIGITAN - Korszerű anyag-, nano- és gépészeti technológiákhoz kapcsolódó műszaki képzési területeken kompetencia alapú, komplex digitális tananyag modulok létrehozása és on-line hozzáférésük megvalósítása</i>	2009-2011	TÁMOP	Digitális tananyag-elemek fejlesztése, videó-előadások és rövid videó- illusztrációk, szabványos e-learning formátumú (SCORM) tananyagcsomagok fejlesztése az Intézet által gondozott témakörökben.

Projekt címe	Megvalósulás időszaka	Program	Rövid leírás
<i>RMWF- Risk Management in Welding Fabrication</i>	2016-2018	EU Erasmus	Új hegesztési továbbképzés és a hozzá kapcsolódó digitális tananyagok kidolgozása a hegesztés területéhez kapcsolódó kockázatok kezelésére az Európai Hegesztési Szövetség irányelveinek figyelembevételével.
<i>D-EWI - Digital Training for European Welding Inspectors</i>	2022-2023	EU Erasmus	Digitális tananyagok kidolgozása a nemzetközi/európai hegesztési gyártásellenőri (IWI/EWI) képzéshez és e-learning módszertani továbbképzés megvalósítása az oktatók kulcskompetenciáinak fejlesztéséhez.
<i>COVE-WENDT - Centre of Vocational Excellence in Welding and Non-Destructive Testing</i>	2024-2028	EU Erasmus	A létrehozandó Hegesztési és Roncsolásmentes Anyagvizsgálati Szakmai Kiválósági Központ célja, hogy összehozza a meglévő szakképzési központok, kutatóintézetek és egyetemek oktatóit, valamint a hegesztési szektor ipari vállalatainak képviselőit az innovációt segítő nemzetközi szintű CoVE hálózat kialakítására. A projektben digitális túszerű képzések kidolgozása valósul meg a hegesztés zöldebbé tétele és hegesztés digitalizációja területén. A Miskolci Egyetem támogató partner a projektben, az Intézet oktatói pedig a Miskolci Szakképzési Centrum szakértőiként vesznek részt a projekt megvalósításában.

Az egyik legutóbbi, 2022-2023 között lebonyolításra került nemzetközi projekt a *D-EWI – Digital Training for European Welding Inspectors* projekt azt a célt tűzte ki maga elé, hogy a jellemzően még hagyományos, tantermi alapú nemzetközi/európai hegesztési gyártásellenőri IWI/EWI (*International / European Welding Inspectors*) képzéseket modernizálja, és az európai hegesztési ellenőrök képzési programjaként innovatív digitális tanfolyamot kínáljon, amely a napi munkával párhuzamosan is elvégezhető. Ezeket az oktatási anyagokat olyan innovatív tantervek mentén fejlesztette ki a nemzetközi konzorcium, amelyek a tanulási eredményeken alapuló megközelítéshez igazodnak, megfelelően az EU képesítési keretrendszere szintjeinek [18].

A projekt konzorciumának vezetője a Román Hegesztési és Anyagvizsgálati Intézet (ISIM) volt, amellyel több sikeres projektet valósítottunk meg. A projekt résztvevője volt a Spanyol Hegesztési Szövetség (CESOL), a Portugál Hegesztési és Minőségbiztosítási Intézet (ISQ) az Olasz Hegesztési

Intézet (IIS), a Brandware Media informatikai vállalkozás. E projekt kapcsán is érdemes kiemelni a nemzetközi szakmai szervezetek – köztük a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW) és az Európai Hegesztési Szövetség (EWF) – meghatározó, aktív szerepvállalását. Módszertani szempontból újszerű megoldást alkalmazott a projekt egy mesterséges intelligenciára épülő innovatív online programmal, amellyel az előadásokhoz, videókhoz kapcsolódó írott szöveget angol nyelvű hanganyaggá alakítva magas színvonalú, egységes narrációt hozhatott létre a soknyelvű szakmai közösség. A D-EWI projekt keretében a képzés megszerzésének elősegítéséhez digitális tananyagokat és tartalmakat dolgoztak ki a következő témakörökben:

- minőségbiztosítás és minőségellenőrzés;
- hegesztési varratok vizsgálata és jelentések készítése;
- gyakorlati ismeretek az anyagvizsgálatokra vonatkozóan.

Az elkészült e-learning tananyagok prezentációkból, dokumentumokból és videókból állnak. A korszerű digitális tananyagokat a magyar nyelvre történő fordítást követően a Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés (MHtE) használja a gyártásellenőri képzések lebonyolítása során. Bizonyos tananyag elemeket a Miskolci Egyetem nemzetközi hegesztőmérnök (EWE/IWE) képzésében is alkalmazunk.

A hegesztéshez kapcsolódó oktatási anyagok fejlesztése mellett az Intézet feladata volt a konzorciumi partnerek, tananyagfejlesztők módszertani felkészítése is, egy *blended learning* formában szervezett *staff training* program keretében. Az egyetem e-learning szakemberei és a Brandware Media szakemberei 24 órás képzést szerveztek a 13 hazai és külföldi résztvevőnek. A projekt keretében kidolgozott tréning célja az volt, hogy a résztvevők megismerjék az e-learning alapjait és digitális eszközeit, beleértve a fejlett oktatási módszereket, valamint gyakorlati példákon keresztül elsajátítsák a MOODLE rendszer alkalmazását. A képzés eredményeként a résztvevők megfelelő kompetenciákra tettek szert ahhoz, hogy képessé váljanak tananyagokat készíteni és e-learning alapú tanfolyamokat szervezni saját szakterületükön, korszerű digitális e-learning eszközök segítségével. Nagyon hasznos része volt a képzésnek, amikor a trénerek áttekintést készítettek a különböző tanulógenerációk (például X, Y és Z generáció) jellemzőiről, valamint bemutatták azokat az interneten elérhető tanulást segítő alkalmazásokat, amelyekkel élményszerűbbé tehető az oktatás. A kurzus végén a MOODLE-n keresztül online vizsgát szerveztek a résztvevőknek, amelyet minden résztvevő sikeresen teljesített, így megkaphatták a Miskolci Egyetem által kiállított bizonyítványt. A Miskolci Egyetem a bizonyítvány kiállítására való jogosultság megszerzése érdekében a képzést az országos hatóságnál az alábbi hivatalos néven vette nyilvántartásba: *Digitális e-learning eszközök módszertana és alkalmazása a műszaki felsőoktatásban*. Az e-learning módszertani képzésre kidolgozott tananyagokat a Miskolci Egyetem is hasznosítja az oktatói továbbképzéshez. A projekt eredményei és a tananyagok a projekt weboldalán (<https://d-ewiproject.eu/>) érhetők el.

A röviden ismertetett projektek jelentős részében nem, vagy nem csak magyar nyelvű tananyagok fejlesztése valósult meg az Intézet által művelt tudományterületeken. Az angol nyelvű prezentációk és multimédiás anyagok kiválóan hasznosíthatók a Miskolci Egyetemen egyre jelentősebb létszámban tanuló külföldi hallgatók angol nyelven folytatott képzése során. Ennek támogatására, és a korábbi projektek eredményeinek újrahasznosítása érdekében, megkezdtük egy intézeti tananyag-tár fejlesztését, amelyhez az intézményben minden oktató számára elérhető Microsoft 365 programcsomag SharePoint szolgáltatását alkalmazzuk.

3.4. Hol tartunk az oktatás digitalizációjában

Bár a dokumentum létrejötte óta eltelt pár év, összességében továbbra is egyet kell értenünk a Magyarország Digitális Oktatási Stratégiájában [20] a hazai felsőoktatási helyzetelemzésében olvasható megállapítással: „legtöbbször igen alacsony szintű a digitális támogatás ... a digitális oktatás lassan és szigetszerűen fejlődik”. A „Fokozatváltás” stratégiájának [1] oktatási innovációra vonatkozó fejezete szerint „a teljesítmény-visszatartó, rossz beidegződések és pedagógiai gyakorlatok” (például kontaktóra-központúság, alacsony önálló hallgatói munkavégzés) felszámolására, intenzívebb tanulási élményre, módszertani megújulásra, nem hagyományos képzési formák elterjedésére van szükség.

A rossz beidegződések megszüntetése az oktatás humán erőforrásain múlik, és alapvetően két, súlyosan az ellen ható szempontot érdemes kiemelni. Az egyik, az iskolarendszerű képzések közül a felsőoktatás az egyetlen képzési szint, ahol az oktatók jelentős hányadának semmiféle pedagógiai képzettsége sincs, így ismeretek és kompetenciák híján azt a modellt követik oktatási tevékenységük során, amelyet hallgatóként megtapasztaltak. A másik, még kritikusabb tényező a motiváció hiánya: az oktatók egyéni előmenetele valljuk be, a legkevésbé sem függ az oktatási tevékenységük minőségétől, az abba befektetendő munka és idő így „veszteségnek” tekinthető a kökeményen számonkért, tudománymetriai paraméterekkel számszerűsített, objektív teljesítmény-tényezőnek tekintett kutatási eredményesség szempontjából. Ez lehet a magyarázata annak is, hogy a fiatal oktatók körében sokszor alacsonyabb szintű az ambíció a digitális oktatási módszerek alkalmazására, mint azon idősebb kollégáik körében, akik már úgy mond „befutottak” annyira, hogy esetleg erre is fordíthatnak némi figyelmet és energiát.

A pandémia által kikényszerített digitális átállás azonban váratlanul a digitális világhoz való gyorsabb alkalmazkodást indukálta, s az e-learning megszállottjai talán úgy érezhették: most végre beérhetnek a paradigmaváltás feltételei – de nem így történt. Természetesen az IKT eszközhasználat terén jelentős előrelépés volt tapasztalható, de az átállásra rendelkezésre álló idő rövidsége miatt is a szemléletmód-váltás ezúttal sem következett be: az oktatók többsége a hagyományos oktatási gyakorlatát ültette át a virtuális térbe.

A teljesség igénye nélkül tehetünk néhány megállapítást tapasztalataink alapján.

- Az „élőben” közvetített hagyományos előadások sok esetben csak az órarendi időszakban voltak elérhetőek, megkövetelve a távoli, de azonos idejű jelenlétet, holott a távoktatás hatékonysága mellett annak rugalmassága lehet az egyik legjelentősebb előny.
- Pdf és ppt file-ok sokasága került fel különböző platformokra, sajnos az intézmények többségében rendelkezésre álló, egységes e-learning rendszerek használata helyett rendkívül változatos módon biztosítva az elérhetőséget (e-mail, tanszéki honlap, GoogleDrive, Classroom, Facebook-csoport stb.) – kaotikus tanulási környezetbe, jelszavak és linkek áradatába fullasztva a hallgatókat.
- A tudásellenőrzés, számonkérés megnövelt számú beadandó feladatot, teszteket és élőben, valamilyen videókonferencia-rendszerben megvalósult szóbeli vizsgákat foglalt magába.
- Sajnálatosan az együttműködés hiánya, a tartalmak és a tapasztalatok megosztásának rendkívül alacsony szintje jellemezte a felsőoktatás távolléti oktatásának napi gyakorlatát. Intézményi szinteken készültek ugyan jobbára technikai tudnivalókat tartalmazó útmutatók, de a közoktatásban tapasztalt nagy számú, alulról jövő kezdeményezéssel, tartalom-megosztást és az online módszerek alkalmazását támogató közösségek kialakításával, link-gyűjteményekkel a felsőoktatásban nemigen találkoztunk. A Felsőoktatásért Felelős Helyettes Államtitkárság 2020. május végére meghirdetett ugyan egy videó-konferencia sorozatot a gyakorlati tapasztalatok megosztására, a nagy érdeklődés miatt várható technikai problémák okán ezeket végül rögzített videó-előadások formájában tették

közzé – az eltelt 4 év alatt a dedikált YouTube csatornára [21] mindössze 14 fő iratkozott fel, az egyes videók (4 magyar és egy angol nyelvű) alig 100-300 megtekintést értek el.

A közelmúltban számos kutatás, felmérés eredménye látott napvilágot a pandémia alatti digitális oktatás tapasztalatainak értékelésére és a várható változások előrejelzésére. A többnyire a hallgatók pozitív és negatív tapasztalatait összegző, jelentős számú hallgatói visszajelzés eredményeiből két adatot látunk itt kiemelésre különösen érdemesnek:

- több, mint 11 ezer hallgató válasza alapján megállapítható, hogy még a távoktatással egyáltalán nem elégedett hallgatók is a kontakt óráknak legalább egynegyedét kívánnák a jövőben online órákkal kiváltani, a távoktatással elégedett hallgatók esetén ez az arány 60-70% között van [22];
- az online oktatás iránti nyitottság – amint az várható volt – elsősorban a levelező képzési formákban, műszaki-természettudományos képzési területeken tanuló, 25-46 év közötti, a tanulás mellett munkát is vállaló hallgatókat jellemzi [23].

A mérnökképzésben érintett felsőoktatási intézményeknek tehát érdemes lenne erőfeszítéseket tenni a levelező képzés távoktatási módszerekkel való modernizációja irányában, egyúttal szélesebb körben alkalmazni a hatékony digitális oktatási módszereket a nappali képzésben.

4. Javaslatok

Amint azt a bevezetőben hangsúlyoztuk, tanulmányunk összefoglalásaként elsődlegesen olyan javaslatokat kívánunk megfogalmazni, amelyek megvalósítása nem igényel jelentős finanszírozási forrásokat, és átfogó, rendszerszintű beavatkozásokat, hanem alapvetően rajtunk, oktatókon és szakembereken, szakmai közösségeink együtt gondolkodásán és együttműködésén múlik.

Fontos azonban hangsúlyoznunk, hogy semmiképp sem az online oktatás elsőbbségét, még kevésbé kizárólagosságát tekintjük célravezetőnek, hanem az online megoldások hatékony integrálását a képzési/tanulási folyamat bizonyos hányadában, az ún. *blended learning* elvnek megfelelően, azaz a kevert oktatási módszerek alkalmazását szorgalmazzuk.

4.1. Szakmai szervezetek szerepvállalása a folyamatos tapasztalatcserében és a felsőoktatás nemzetköziesítésében

A hazai és a nemzetközi szakmai szervezetek katalizálhatnak és koordinálhatnak az adott szakterületeken az oktatás-fejlesztési tevékenységeket, ennek érdekében célszerű lenne létrehozni releváns munkacsoportokat, így az azonos szakmai tématerületen dolgozó szakemberek között sokkal intenzívebb és hatékonyabb lehet a kommunikáció, a tapasztalatcsere és az együttműködés. Az egyes tématerületeken szerveződő konferenciákhoz kapcsolódóan szimpóziumok – például a konferencia előtti napon, meghívott előadókkal, akik az új lehetőségeket, jó gyakorlatokat mutatják be, – majd a konferencia zárásakor kerekasztal-beszélgetések, ötlet-börzék, közös projekt-ötletek kidolgozását segítő műhelyviták keretében kialakíthatók és megoszthatók lennének a korszerű tartalmak és a hatékony módszertani megoldások.

Bár az érdemi tevékenység a szűkebb szakmai munkacsoportokban zajlana, fontos feladat lenne annak biztosítása, hogy a munkacsoportok közötti tapasztalatcserére is rendszeres alkalmakat szervezzünk a jó gyakorlatok megosztására, valamint, hogy biztosítsuk az információ-áramlást és az együttműködés lehetőségét a hazai és nemzetközi szervezetekkel, platformokkal (mint például a STEM Platform).

A szakmai szervezetek számára pályázati forrásokat kellene biztosítani, hogy pályázhassanak olyan finanszírozási lehetőségekre, amelyek munkacsoportjaik célirányos tevékenységeit támogathatnák: meghívott előadók költsége, oktatásfejlesztésért adható minőségi díj verseny meghirdetése – a díjazott számára nyereményként például nemzetközi oktatásfejlesztési rendezvényen való részvételt biztosítva.

Fontos lenne a szakmai szervezetek számára pályázati forrásokat biztosítani arra is, hogy a releváns nemzetközi szakmai szervezetekben a hazai felsőoktatási intézmények és szakemberek folyamatos részvételének ne legyen pénzügyi akadálya (tagdíj-fizetés, megbeszéléseken való részvétel költségei).

4.2. Az oktatók szemléletváltásának elősegítése, módszertani és IKT kompetenciáinak fejlesztése

Az oktatók korszerű pedagógiai szemléletmódjának és módszertani felkészültségének a kialakítása nem lenne eredményes (sőt kontraproduktív lenne), ha kötelező, pedagógiai alapképzésben való részvétellel még tovább fokoznánk leterheltségüket. Az előzőekben említett, szakmai konferenciákhoz kapcsolódó szimpóziumok, szemináriumok vagy akár „hands on” tréningek azonban költség-hatékonyan biztosíthatnák ilyen irányú tájékozódásukat is. Fontos, hogy minden anyagot, pedagógiai módszert vagy megoldást az adott szűkebb szakterületről vett példával illusztráljunk! Egy kötelező, tanfolyami rendszerű, általános pedagógiai alapképzés helyett a célirányosan és szakmaspecifikusan, jó gyakorlatokon keresztül bemutatott pedagógiai megoldások sokkal motiválóbbak lennének az oktatók számára, és hatékonyabban elősegítenék az e téren szükségessé vált szemléletmód-váltást.

4.3. Nyílt elérhetőségű tananyag-elemek (OER) portáljának fejlesztése

A közoktatás számára létrehozott tudásbázis (<https://tudasbazis.dpmk.hu/>) portáljához hasonlóan szükségesnek látjuk létrehozni a műszaki felsőoktatás nyílt elérhetőségű, változatos módszertani megoldású tananyag-elemeinek OER portálját, amelyben a hazai szakemberek/intézmények/projektek által kidolgozott tananyag-elemek tisztázott jogi feltételekkel (Creative Commons) hasznosíthatóak lennének. A szerzők/tananyagfejlesztők által feltöltésre javasolt tananyagelemek a folyóiratcikkekhez hasonlóan „peer review” minőségellenőrzésen mennének keresztül, és ennek alapján kidolgozható lenne egy olyan értékelési rendszer is, amely az oktatásfejlesztési tevékenység elismerését tenné lehetővé (a tudományometriai értékeléshez hasonlóan) az oktatói teljesítményértékelési rendszerben.

A tananyag-elemek fejlesztésébe rendkívül fontos lenne ipari szereplőket is bevonni, a gyakorlat számára fontos aspektusok és tapasztalatok megosztásának céljával – a korábbiakban részletezett munkakapcsolatok egyik hozadékaként, kölcsönös előnyöket kínálva.

Az OER portál nemcsak hazai fejlesztésű és magyar nyelvű tananyag-elemeket tartalmazna, hanem rövid, magyar nyelvű leírással és linkkel elérhetővé lehetne tenni nyílt elérhetőségű, idegen nyelvű, releváns tananyag-elemeket, forrásanyagokat is.

4.4. Aktív hallgatói részvétel

A hallgatók aktív részvétele az oktatásfejlesztés folyamataiban nem pusztán az oktatók/képzési programok véleményezésében merülne ki, hanem kreativitásukat és kiváló digitális kompetenciáikat hasznosítva a tananyagfejlesztésben is érdemi szerepet játszhatnak. Ennek érdekében például kezdeményezni lehetne egy, a TDK-hoz hasonló rendszer kialakítását, amelyben a hallgatói pályaművek nem kutatási feladatok, hanem oktatás-fejlesztési feladatok lennének (például multimédiás illusztrációk, interaktív feladatok, kiterjesztett és virtuális valóság alkalmazása),

konzulensi irányítással. Az ellenőrzött minőségű tartalom-elemek természetesen bekerülnének az előzőekben részletezett OER portálra is, az oktató és hallgató közös szellemi produktumaként.

A hallgatók aktívan közreműködhetnek az OER tudásbázisba feltöltendő, mások által fejlesztett, nyílt elérhetőségű forrásanyagok keresésének, rendszerezésének, értékelésének, s esetlegesen – ha a szóban forgó forrásanyag esetében annak jogi feltételei adottak – az adaptációjának (magyar nyelvű változat, feliratozás, rövidítés stb.) feladataiban is.

5. Összegzés

Az előző fejezetekben részletezett helyzetelemző gondolatok, és az azok alapján megfogalmazott javaslataink összefoglalásaként fontosnak tartjuk hangsúlyozni: meggyőződésünk szerint érdemi változást elsősorban az oktatóknak az oktatás minősége iránti személyes elkötelezettsége, motivációja eredményezhet. Ennek fokozása érdekében azonban inspiráló intézményi és szakmai környezetre, az e téren mutatott erőfeszítések fokozottabb elismerésére lenne szükség. A felsőoktatási intézmények átgondolt, módszertanilag megalapozott e-learning stratégiájának megfogalmazása során fontos lenne, hogy az érdekeltek e feladatokat nem az n+1-dik jelentőséggel bíró, megoldásra váró problémaként, hanem számos jelentős probléma és feladat – például a lemorzsolódás csökkentésének – lehetőségeként, megoldásaként lássák.

A mindennapokban mindannyiunkat körülvevő információs szmogban több segítséget kell biztosítani (például „egyablakos” információs pontok, portálok kialakításával) az oktatók számára, hogy célirányosan, hatékonyan, idő-pazarlás nélkül jussanak érdemi információkhoz és módszertani segítséghez az oktatói munkájuk magasabb színvonalú ellátását támogató IKT megoldások, jó gyakorlatok megismerésében, alkalmazásában. Ugyanezek a felületek alkalmasak lehetnek webináriumok, módszertani képzések és konzultációk szervezésére is, rendszeressé és hatékonyá téve a szakemberek közötti tapasztalatcserét, kommunikációt.

A mérnökképzés tartalmi és módszertani megújulása elsősorban rajtunk, oktatókon múlik: fordítsunk több figyelmet, tegyünk több erőfeszítést annak érdekében, hogy napról napra jobban hasznosítsuk az oktatás korszerűsítésében rejlő lehetőségeket.

Irodalom

- [1] „Fokozatváltás a felsőoktatásban, középtávú szakpolitikai stratégia,” 2016, Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: https://2015-2019.kormany.hu/download/c/9c/e0000/Fokozatváltas_Felsooktatásban_HONLAPRA.PDF
- [2] „STEM Education Policies in Europe,” 2018, Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <http://www.scientix.eu/documents>
- [3] „Magyarországi STEM platform,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://stembungary.com>
- [4] Z. Kolozsváry, „The Part and the Whole – a complex relationship between education-innovation- production,” presented at Conf. on Uni. and Bus. Coop. in Cent. Eur. (CUBCCE), Budapest, Hungary, Jan. 28–29, 2016.
- [5] Z. Kolozsváry, „The critical role of education in the chain of innovation-education-production,” presented at Conf. on Uni. and Bus. Coop. in Cent. Eur. (CUBCCE), Budapest, Hungary, Dec. 4, 2017.
- [6] M. Kocsis Baán, „International projects in Surface Engineering in collaboration with Professor Tom Bell,” *Surf. Engng.*, vol. 26, no. 1-2, pp. 12–14, 2010.

- [7] M. Kocsis Baán, „A mérnökképzés nemzetköziesítése és módszertani korszerűsítése,” *Gép*, vol. 71, no. 5-6, pp. 31–35, 2020.
- [8] „Sulinet Tudásbázis,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://tudasbazis.sulinet.hu>
- [9] „Digitális Tankönyvtár,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://dtk.tankonyvtar.hu/>
- [10] OECD, „Giving Knowledge for Free: The Emergence of Open Educational Resources”, OECD Publishing, Paris, 2007, Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://doi.org/10.1787/9789264032125-en>
- [11] EPRS (European Parliamentary Research Service), „Open Education: OER, OCW and MOOCs,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://eprthinktank.eu/2013/10/01/open-education-oer-ocw-and-moocs/>
- [12] „Class Central,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://www.classcentral.com/>
- [13] „Kárpát-medencei Online Oktatási Centrum,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://www.kmooc.uni-obuda.hu/>
- [14] „OER Commons,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://oercommons.org/>
- [15] The University of Liverpool, „matter,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://www.matter.org.uk/>
- [16] „Steeluniversity,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://steeluniversity.org/>
- [17] University of Cambridge, „Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS),” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://www.doitpoms.ac.uk/>
- [18] „Digital Training for European Welding Inspectors (D-EWI),” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://d-ewiproject.eu/>
- [19] J. Hart, „Top 100 Tools for Learning 2024”, Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://toptools4learning.com/>
- [20] Digitális Jólét Program, „Magyarország Digitális Oktatási Stratégiája,” 2016 Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://digitalisjoletprogram.hu/files/55/8c/558c2bb47626ccb966050debb69f600e.pdf>
- [21] „Felsőoktatásért Felelős Helyettes Államtitkárság YouTube csatornája,” Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://www.youtube.com/channel/UCCr6wq3nvAOuJFx-SJkg0qQ>
- [22] HÖÖK, „Távoktatás jelentés,” 2020, Accessed: 2024.12.03 [Online] Available: <https://hook.hu/hu/felsooktatas/tavoktatas-jelentes-2851>
- [23] J. Dombi, „On-line, offline, blended – mitől függhet a jövő? Hallgatói tapasztalatok és jövőbeni preferenciák összefüggései a Pécsi Tudományegyetemen,” presented at Oktatásinformatika a felsőoktatásban II. - A digitális oktatás átmentett értékei Konferencia, KRE, 2021.10.22.

HIDROGÉN BEKEVERÉS HATÁSA A FÖLDGÁZ RENDSZEREK INTEGRITÁSÁRA

Nagy Nóra

*Tanárségéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: nora.nagy@uni-miskolc.hu

Bencs Péter

*Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: peter.bencs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen áttekintő tanulmány a hidrogén szállításával kapcsolatos problémákat és kockázati tényezőket foglalja össze. A bemutatott kockázati tényezők alapján egy adott csővezetékszakra vonatkozó áramlástanai jellemzőket vizsgáltuk meg. Az áttekintő tanulmányban kitértünk még a gázkeveredési hatások vizsgálatára is, illetve a hidrogén rétegződési jelenségének bemutatására is. A cikkben ismertetett tényezők alapján lehetőség van a csővezetékszakaszok üzemeltetésével kapcsolatban felmerülő kockázati faktorokat súlyozni a hidrogénes kitétség szempontjából.

Kulcsszavak: hidrogén, kockázatértékelés, csővezeték

Abstract

This overview study summarises the problems and risks associated with the transport of hydrogen. Based on the risk factors presented, the flow characteristics for a specific pipeline section have been investigated. The overview study also includes an analysis of gas mixing effects and the hydrogen stratification phenomenon. On the basis of these explained studies (using the safety risks presented), an assessment of the problems in the pipeline section is made. Based on the described susceptibility factors in this article, it is possible to weight the risk factors arising in connection with the operation of pipeline in terms of hydrogen exposure.

Keywords: hydrogen, risk assessment, pipeline

1. Bevezetés

A jövőben a hidrogén kulcsfontosságú energiahordozó lehet a költséghatékonyság és a fenntarthatóság tekintetében. Ebben a kutatásban a hidrogénnek a földgázvezeték-hálózatokba való beléptetésével kapcsolatos fontosabb kérdéseket mutatjuk be, a szállítóvezetékek vonatkozásában.

Általánosságban elmondható, hogy a hidrogén földgázhoz történő bekeverése a megfelelő körülmények között és viszonylag kis hidrogénkoncentráció mellett csak minimális átalakításokat igényel a csővezeték-hálózat működtetésében és karbantartásában. A hidrogén-földgáz keveréket el

lehet juttatni a végfelhasználói rendszerekbe, vagy a hidrogént le lehet választani (szeparálni) és felhasználni az olyan eszközökben, mint például a hidrogénes üzemanyagcellák.

Ha az energiarendszerek szén-dioxid-mentessé válnak, a hidrogén hasznos energiahordozó lehet. Számos alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrás, például biomassza, nukleáris és megújuló villamos energia, valamint a szén vagy a földgáz szén-dioxid-leválasztással és -megkötéssel hidrogén előállítására alkalmas, amely aztán számos célra felhasználható akár lakossági, akár ipari fűtésre és áramtermelésre, valamint szezonális energiatárolásra. Az egyik legnagyobb kihívás azonban még mindig a hidrogén összes ilyen célú felhasználásához szükséges infrastruktúra kiépítése. Annak érdekében, hogy a hidrogén előnyeit az új, speciális infrastruktúra kiépítésének költségei nélkül kihasználhassuk, a kutatók, a vállalkozások, valamint a helyi és nemzeti kormányok egyaránt vizsgálják a hidrogénnek a földgázvezeték-hálózatokba való bekeverését. Ennek a stratégiának számos lehetséges előnye és hátránya van.

A földgázt jelenleg olyan nehezen szén-dioxid-mentesíthető ágazatokban használják, mint az energiaszektor, a lakossági és a kereskedelmi fűtés, valamint az ipari-technológiai műveletek. Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogénnek a földgázzal való keverése potenciálisan csökkentheti ezen ágazatok szén-dioxid-intenzitását. A földgáz-infrastruktúra és a földgáztól függő valamennyi szektor szén-dioxid-kibocsátása csökkenthető lenne, ha az alacsony szén-dioxid-kibocsátású forrásokból, például a szél- és a napenergiából előállított hidrogént betáplálnák a földgáz-infrastruktúrába. Azáltal, hogy a hidrogén a hálózati villamos energiával egyenértékű energiahordozóként szolgál – ezt a funkciót a földgázhálózat már most is ellátja –, tovább növelheti az energiabiztonságot és az ellenálló képességet. Ha a hálózatnak villamosenergia-csúcsra van szüksége, a hidrogén – a földgázhoz hasonlóan – módot kínál a villamosenergia-ellátásra. A hidrogén a villamos energia helyettesítőjeként is használható, például az otthonok és a vállalkozások fűtésére. Ahogy egyre több változó megújuló energiaforrás kezd áramot szolgáltatni az elektromos hálózatba, a hidrogén rugalmas elektromos terhelésként is működhet, ami egyre előnyösebbé válik [1], [2].

Kiváltképp a víz elektrolízise kínál egy lehetséges módszert a hidrogén minimális költséggel történő előállítására, extrán megújuló villamos energiából. Mivel a hidrogénnek a földgázhálózatokba való beépítése elősegítheti az egész gazdaság szén-dioxid-mentesítését, miközben megőrzi a földgázhálózatok által a helyi, nemzeti és nemzetközi energiarendszerek számára nyújtott előnyök egy részét, számos vállalkozás, kutató és kormány érdeklődik az ötlet iránt. Az előzőekben bemutatott lehetőségek tovább növelik a jelenlegi földgázhálózatok jelentőségét a jövőben az országok energiaszolgáltatási stratégiájában. A földgázhálózatok e tulajdonságai növelik az energiarendszer rugalmasságát és biztonságát. Jelen kutatásban összefoglaljuk a földgázhálózatba kevert hidrogén lehetséges hatását a földgázhálózat biztonságára, mely fontos információt szolgáltat a hálózat fejlesztési stratégiák kialakítása során.

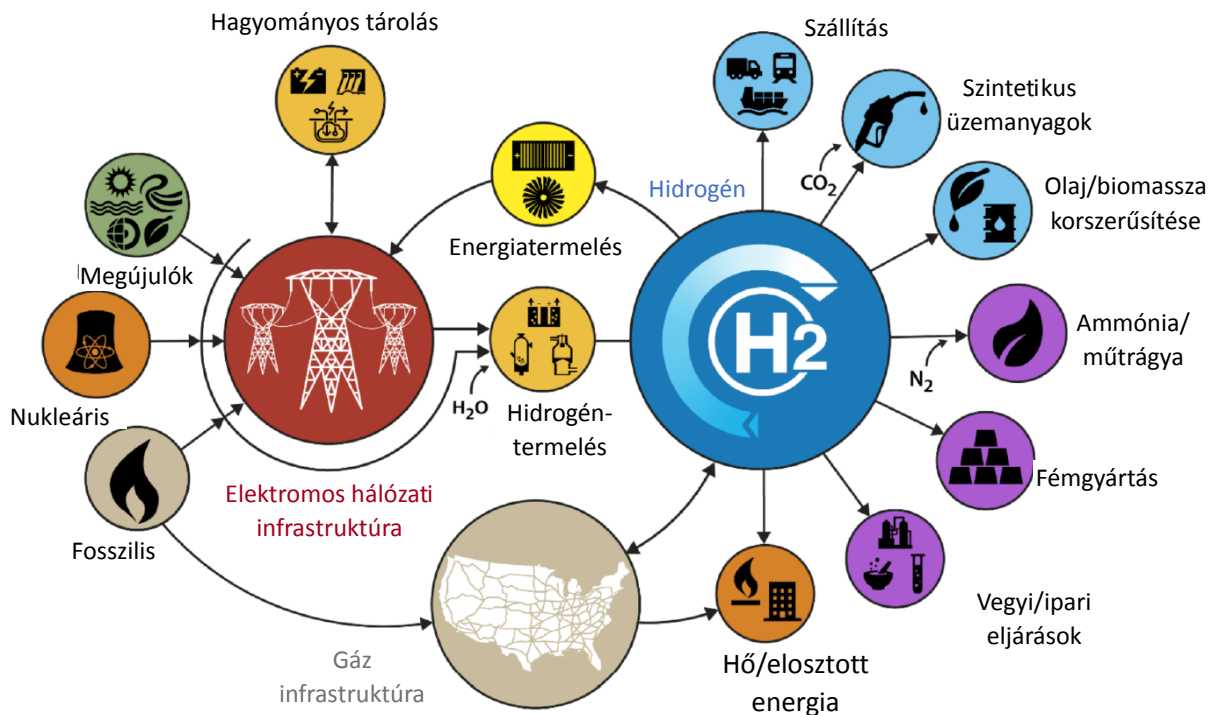
2. Hidrogénnel kevert földgáz

A földgáz főként metánból áll. A metánhoz képest a hidrogén gyorsabban ég, alacsonyabb a gyulladási energia minimuma, és szélesebb gyúlékonysági tartománnyal rendelkezik. Ezen tulajdonságok alapján a hidrogén-levegő keverékek égetésekor – előkeveréssel vagy anélkül –, az égés során kialakult lángot nehéz eloltani. Az égetés során jelentős mennyiségben keletkeznek nitrogén-oxidok (NO_x), amelyek mennyisége körülbelül 500 ppm. Bár a levegő előkeverési arányának emelése jelentősen csökkenti az NO_x -tartalmat, ez azonban növeli a visszagyulladás valószínűségét. Az NO_x -termelés csökkentése és a visszagyulladás megakadályozása közötti kompromisszum a hidrogénegetés egyik legfőbb dilemmája.

Ezzel szemben a hidrogén kedvező és kedvezőtlen égési tulajdonságaiból a következő előnyök adódnak, amikor földgázzal keverve égetjük: a gyúlékonyság növekedése miatt az égés folyamatossá válik és a gyújtási, illetve a visszagyújtási energia csökken; az egy térfogatra jutó égési energia növekedése lehetővé teszi, hogy kis égővel nagy mennyiségű hőenergiát termeljenek; a nagyobb levegő előkeverési arány lehetővé teszi az NO_x -termelés elfojtását visszagyújtás nélkül [2].

Ahelyett, hogy a gazdaság szén-dioxid-mentesítésében kizárólag a villamosításra támaszkodnánk, költséghatékonyabb és rugalmasabb lehet a meglévő gázhálózatok használata hidrogéntermeléshez. Emellett, a földgázhálózatok hidrogénüzemre való átállítása bővítheti az általuk kiszolgálható piacokat. A földgáz hagyományos felhasználási területein kívül – mint például a villamosenergia- és a hőtermelés, a vegyipar és az ipari folyamatok, valamint a fém- és a műtrágyagyártás –, a hidrogén felhasználható szintetikus üzemanyagok előállítására, vagy közvetlenül hidrogénüzemű autók üzemanyagaként is.

A hidrogén-skála koncepciót az 1. ábra mutatja be a hidrogén előállítási módszereivel és felhasználási módjaival együtt [5].



1. ábra. A hidrogén-skála koncepció [5].

Bár a hidrogénnek a meglévő földgáz-infrastruktúrába való beépítése számos előnnyel járhat, ezt több olyan megfontolás és ismeretlen tényező nehezíti, amelyek azzal kapcsolatosak, hogy a meglévő földgázvezeték-infrastruktúra mennyire működne optimálisan a hidrogén használata esetén. A földgázszállító és -elosztó hálózatok különböző részeinek hidrogénnel való kompatibilitása az egyik ilyen és az ehhez köthető bizonytalanság. Ezek a hálózatok jelenleg a földgáz kitermeléséből, feldolgozásából, szállításából, elosztásából és a végfelhasználókhoz történő eljuttatásából állnak,

amelyekre hatással lesz a hidrogén bevezetése. A földgáz és a hidrogén termodinamikai, szállítási és égési jellemzői nagyon eltérőek [3], [5].

A hidrogén bekeverésnek a szerkezetintegritással és a biztonságos üzemeltetéssel kapcsolatos aggályai közé tartoznak a gázszivárgások és a csővezetékrendszerek anyagtulajdonságainak a romlása. Még mindig vannak megválaszolatlan kérdések azzal kapcsolatban, hogy hogyan lehet ezt figyelembe venni annak meghatározásakor, hogy a hálózati rendszerek és rendszerelemek milyen mértékben kompatibilisek a hidrogénnel. Ismert tény, hogy a gáznemű hidrogén jelentős hatással van a csővezetékek acéljainak tulajdonságaira, de további vizsgálatok szükségesek a polietilén csővezetékanyagok hidrogénnel szembeni tűrőképességének megállapításához, mivel a hidrogén hatásai ezen anyagcsoportnál nem ismertek teljeskörűen.

3. Biztonsági értékelés

Nehéz megmondani, hogy a hidrogénnek a földgázvezeték-rendszerbe történő bevezetése milyen hatással lesz a végfelhasználói berendezésekre és a meglévő hálózati infrastruktúrára, mivel a különböző gázkeverékek termodinamikája és szállítási tulajdonságai drasztikusan megváltozhatnak. Ezeket a jelenségeket vázoljuk fel, valamint a földgázvezeték-rendszer azon jellemző helyeit, ahol ezek potenciálisan előfordulhatnak. E problémák megoldása nélkül a hidrogén gázvezetékekbe történő betáplálása negatív hatással lehet a földgáz rendszerek biztonságára és megbízhatóságára. A biztonság, a megbízhatóság és a pénzügyi fenntarthatóság biztosítása érdekében a hidrogén bekeverési lehetőségek mérlegelésénél figyelembe kell venni a szükséges berendezés-korszerűsítéseket és a hálózat üzemeltetési és karbantartási gyakorlatának szükségszerű megváltoztatását. Ezeket a kérdéseket a következő alfejezetekben, mind a szállító-, mind az elosztóhálózatokra vonatkozóan tárgyaljuk, a hálózati szakaszoktól az egyes berendezésekig terjedően [5].

3.1. Gázfelhalmozódás

Két kísérlet során, ahol az egyik egy nagyobb, tipikusan kereskedelmi vagy ipari épületek helyiségében, a másik pedig egy kisebb, tipikusan lakossági jellegű helyiségben folyt, a gázfelhalmozódást vizsgálták. Megállapították, hogy a keverékek gázfelhalmozódási viselkedése nagyon hasonlít a tiszta földgázéhoz. A hidrogén nem vált ki a keverékből, ahogyan azt várták. Nagyobb gázkoncentrációt eredményezett a megnövelt áramlási sebesség, bár a vártnál kisebb mértékben. 50%-os hidrogénkeverék koncentrációig terjedő keverékek esetében a szivárgás után állandósult koncentráció alig volt nagyobb, mint a földgáz esetében, míg a 70%-nál nagyobb hidrogénkeverékek esetében a koncentráció észrevehetőbben emelkedett (50% és 70% között mérsékelt növekedés figyelhető meg a koncentráció változásban) [5].

3.2. Robbanások a védett térben

A 20%-nál kevesebb hidrogént tartalmazó keverékek esetében a zárt légtérű robbanások intenzitásának arányos növekedése alacsonyabb volt a tisztán földgáz zárt térben történő robbanásokhoz képest. Az 50%-nál több hidrogént tartalmazó keverékek esetében a túlnyomás és az ehhez kapcsolódó károsodás jelentősebb növekedése volt tapasztalható (20% és 50% között mérsékelt növekedés figyelhető meg a robbanási intenzitás változásban). Ha szellőztetést alkalmaznak, vagy csökkentik a bezártságot létrehozó szerkezeti szűkületeket, a nagyobb hidrogénkoncentrációjú robbanásokból származó túlnyomás jelentősen csökkenthető [5].

3.3. A szállítóvezetékéből eredő kockázat

A szállítóvezetékéből eredő kockázatot a csővezetékek meghibásodási gyakoriságának, a gyulladás bekövetkezési valószínűségének és a következmények súlyának szorzataként határozzák meg [5].

A NATURALHY projektben egy könnyen használható szűrési módszert (LURAP) fejlesztett ki, amely lehetővé teszi, hogy az üzemeltetők felmérhessék a földgáz/hidrogén keverékek szállítása által jelentett kockázatot, és összehasonlítsák a jelenlegi kockázati szintekkel [4], [6], [7]. A kockázat egyéni és társadalmi becslése egyaránt lehetséges. A csővezetékek hidrogén okozta meghibásodásának legfőbb oka a hidrogénes elridegedés, amely – mint említettük –, a csővezetékek anyagtulajdonságainak leromlásában mutatkozik meg. A hidrogénatomok, kis méretük miatt, könnyen nagy nyomáson képesek a szerkezeti elem anyagába diffundálni és könnyen nagy koncentrációban anyagszerkezeti hibákat okozni. De kockázati tényezőként jelent a szállítóvezetékek tekintetében a metán és a hidrogén bekeveréséből eredő teljesítmény (nyomás, hőmérséklet) növekedés vagy csökkenés is.

4. A hidrogén és a földgáz eltérő tulajdonságai

Az EU 2030-ra 32%-os megújuló energia részarányt tűzött ki célként [8]. Ugyanakkor, napjainkban még nem áll rendelkezésre olyan hatékony energiatárolási módszer, amely a megújuló energiaforrásokból kinyert nagy mennyiségű energia tárolását képes hosszabb távon megoldani. A megújuló energiaforrásokkal megtermelt villamos energiából elektrolízis útján hidrogént lehet előállítani. A tárolás történhet, akár a szezonális igényekhez igazodó tárolással is.

A hidrogén tárolásának egyik lehetséges módja a földgázvezetékbe történő betáplálás. A power-to-gas technológia során az egyik lehetséges módszer, hogy tiszta hidrogén kerül a földgázvezetékbe, bekeveréssel [9], [10].

A hidrogén földgázvezetékbe történő betáplálása során fontos megvizsgálni a következő, fontosabb tüzeléstechnikai tulajdonságokat, és ezen tulajdonságokat össze kell hasonlítani a földgázéval.

A fűtőérték az a hőmennyiség, amely normál állapotú gáz egységnyi mennyiségének levegő (vagy oxigén) jelenlétében történő tökéletes elégetésekor felszabadul, ha az égéstermékek a kiindulási hőmérsékletre hűlnek vissza, és a keletkezett H_2O gőz állapotban van jelen.

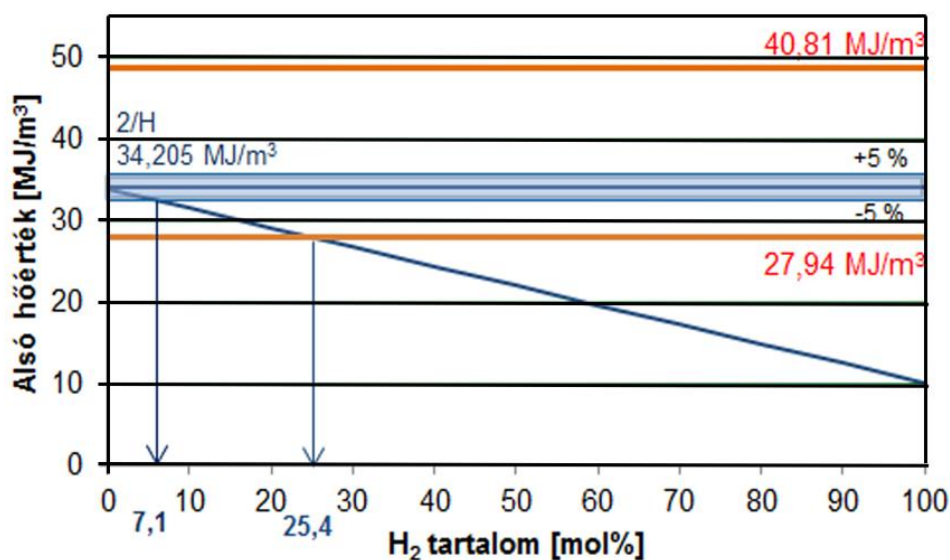
A Wobbe-szám az éghető gázok, például a földgáz, a cseppfolyósított propángáz (LPG) és a városi gáz cserélhetőségének mutatója, amelyet gyakran határoznak meg a gázszállítók előírásaiban.

A hidrogén energiatartalma jelentős mértékben elmarad a metánétól, hiszen hőértéke (a belőle felszabaduló energia mennyisége) kevesebb mint egyharmada a metán hőértékének. Viszont, a hidrogén nagyon kis sűrűségének (1. táblázat) következtében az alsó és a felső Wobbe-számok (az éghető gázok cserélhetőségének legfontosabb paraméterei) már közelebb helyezkednek el egymáshoz, 10-15%-os eltérést mutatva [9], [10].

A 2. ábra szemlélteti a hidrogén bekeverés hatását a hazai gázvezetékben található földgázhoz. A hazai gázszolgáltatásban található földgáz minősége 2H (hivatalos szabályok szerinti érték). A keverék (földgáz és hidrogén) alsó hőértékének (alsó fűtőértékének) változását mutatja növekvő H_2 -tartalom mellett. Az ábrában feltüntetésre kerültek a GET VHR [11] (földgázellátási törvény végrehajtási rendelete) alsó hőértékre előírt határértékei (narancssárga), valamint egy 2H minőségű szolgáltatott gáz, amelynek alsó hőértékétől legfeljebb $\pm 5\%$ eltérés engedhető meg (kék). Látható, hogy a gázkeverék alsó hőértéke már 7,1 mol% hidrogéntartalomnál eléri a szerződött értékre vonatkozó 5%-os eltérés alsó határát. A nemzeti gázszolgáltatási szabvány alsó határát a gázkeverék 25,4 mol% hidrogéntartalom mellett éri el.

1. táblázat. A hidrogén és a földgáz (2H) tüzeléstechnikai jellemzőinek összehasonlítása [9], [10]

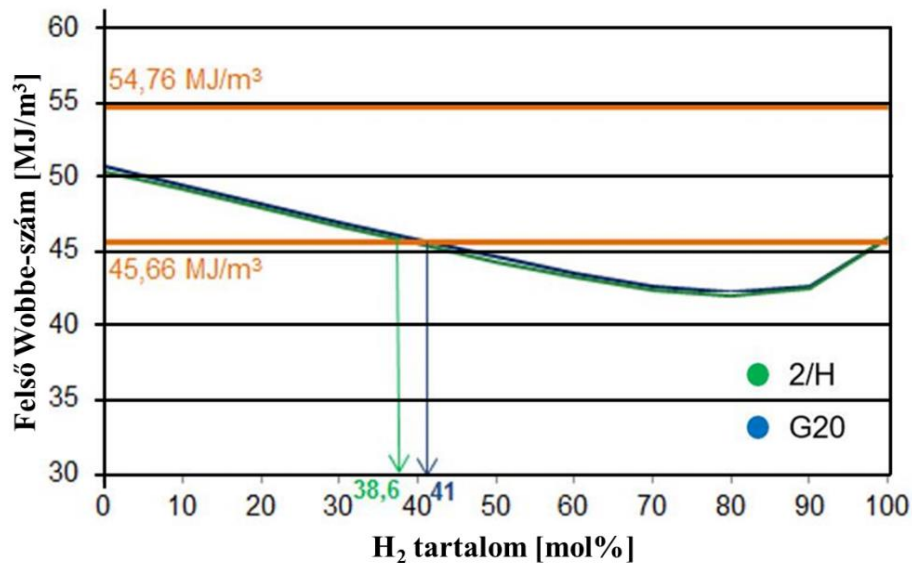
Tulajdonság / paraméter	Hidrogén (H ₂)	Földgáz (2H)
Sűrűség (15 °C, p _n) [kg/m ³]	0,090	0,695
Alsó hőérték (15/15 °C) [MJ/m ³]	10,223	34,205
Felső hőérték (15/15 °C) [MJ/m ³]	12,102	37,973
Alsó Wobbe-szám [MJ/m ³]	38,758	45,406
Felső Wobbe-szám [MJ/m ³]	45,880	50,407
Lángterjedési sebesség [cm/s]	~267	~34
Gyulladási határkoncentráció (20 °C) [tf%]	4,0 – 77,0	4,3 – 15,6
Fajlagos elméleti oxigénszükséglet [m ³ /m ³]	0,499	2,014
Fajlagos elméleti levegőszükséglet [m ³ /m ³]	2,383	9,614
Keletkező CO ₂ [m ³ /m ³]	0,001	1,009



2. ábra. Az alsó hőérték változása növekvő mennyiségű hidrogéntartalom esetén [9].

A 3. ábra a felső Wobbe-szám változását mutatja be a 2H minőségű földgázhoz, valamint a G20 vizsgálógázhoz (tiszta metán) kevert, egyre növekvő mennyiségű hidrogéntartalom mellett. Továbbá feltüntetésre kerültek a GET VHR, a 2H gázminőségre vonatkozó felső Wobbe-szám tartomány határértékei (narancssárga).

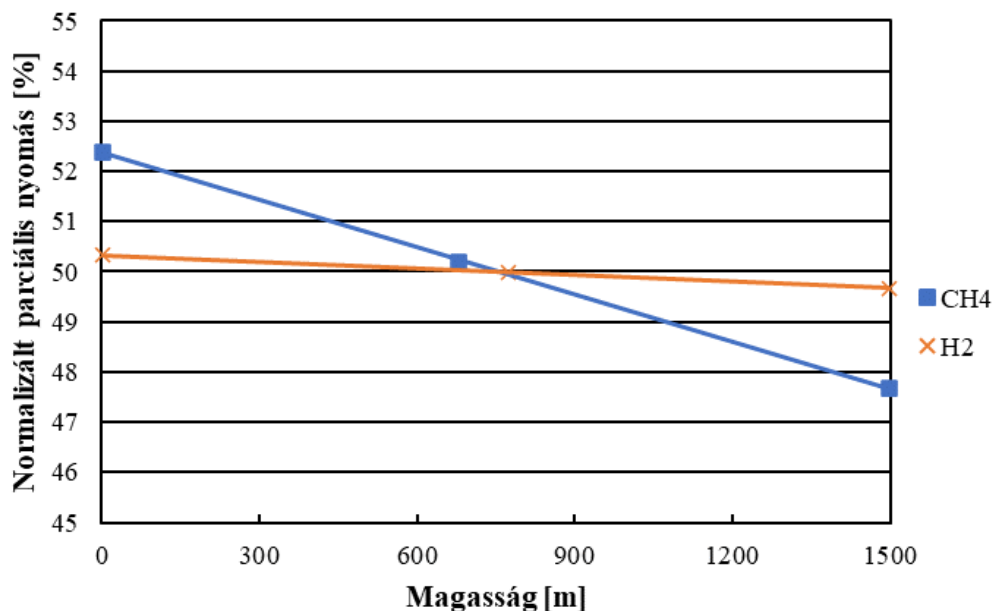
A 2H gázminőség 38,6 mol%, míg a G20 vizsgálógáz 41,0 mol% hidrogéntartalom mellett éri a felső Wobbe-szám tartományának alsó határértékét (az éghető gázok cserélhetőségének alsó határértékét). Összefoglalva a hidrogén bekeverés hatása a földgázra elsődlegesen a fűtőérték változásában mutatkozik meg (a keverék fűtőértéke nagymértékben lecsökken a bekeverés mértékének növelésével). A bekeverés hatására a keverék gáz lángterjedési sebessége is megváltozik, így az égés során használt eszközök is módosítást igényelhetnek nagyobb mértékű bekeverés esetén.



3. ábra. A felső Wobbe-szám változása növekvő hidrogéntartalom mellett [9].

5. Rétegződés a földgáz-hidrogén keverékekben

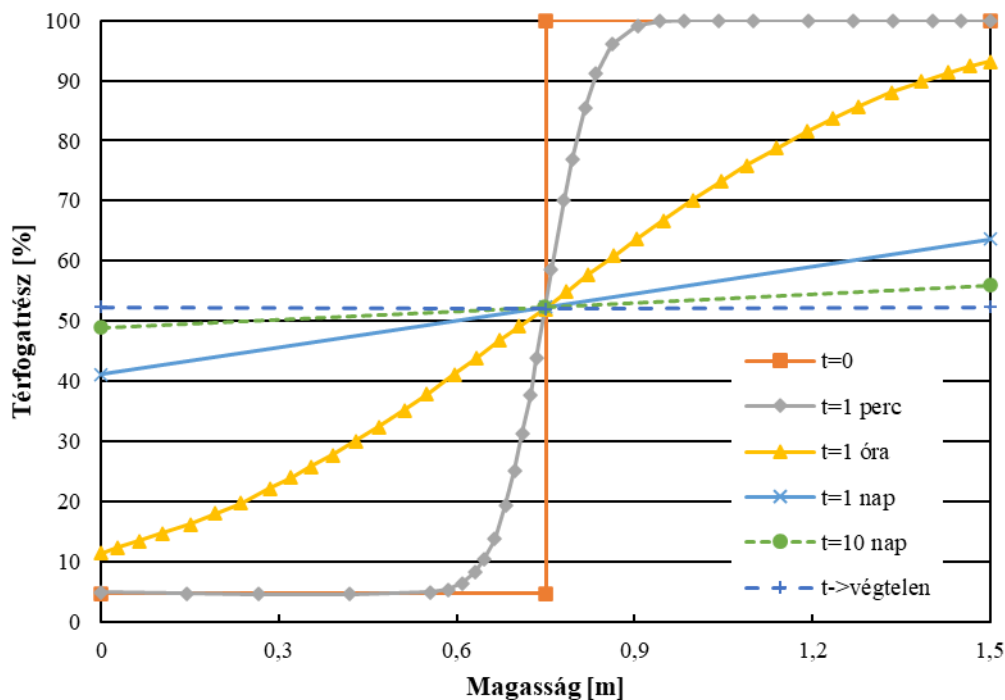
A meglévő földgázvezetékbe történő hidrogén bekeverésekor a hidrogén és a földgáz közötti sűrűségkülönbség egyenetlen koncentráció-eloszlást eredményezhet, ami lokálisan megnövelheti a hidrogén parciális nyomását.



4. ábra. H_2 - CH_4 gázok 1:1 arányú keverékének egyensúlyi eloszlási profilja egy 1500 m magas csőben, 1 G és 300 K hőmérsékleten [13].

Számos tanulmány [12] foglalkozik az áramlási sebesség, a hőmérséklet és a keverési arány hatásával a gázkeverék eloszlásra. Az eredmények azt mutatják, hogy jelentős gázrétegződés csak rendkívül nagy magasság-eséseknél következik be, még 1500 m-es esésnél is a rétegződés elhanyagolható. Ezen kívül megállapítható, hogy a gázdifúzió általában lassú, és akár 300 évbe is beletelhet, amíg egy 1500 m-es csővezetékben 1 bar nyomáson egyensúlyi eloszlás alakul ki (4. ábra).

A H_2 - CH_4 gázkeverék egyensúlyi rétegződését számítással pontosan meg lehet határozni. 1 G reális gravitációs mezőt és 1500 m-es csőmagasságot (megközelítőleg a Shan-Jing csővezeték maximális esése) vizsgáltak [13], amely 1:1 arányban kevert H_2 - CH_4 gázokkal volt töltve. Az 5. ábra a számítások alapján az egyensúlyi eloszlást mutatja. Általánosságban elmondható, hogy a nagy magasságcsökkenések elősegítik a gázok gravitációs rétegződését. De még 1500 m-es nagy esés esetén is csak kis mértékben változik a p_{H_2} (49,7 %-ról 50,3 %-ra), ami nyilvánvalóan túl kicsi ahhoz, hogy a hidrogén okozta elridegedés hatása számottevő legyen. Barthelemy AISI 321 acélon végzett törésmechanikai vizsgálatai alapján a hidrogén parciális nyomása, amelynél a maximális elridegség mérték, 20 és 100 bar nyomás közötti volt. A vizsgálatai kimutatták, hogy a ridegség nagyon gyorsan növekszik alacsony nyomáson, mielőtt 25 bar közelében elérné az állandósult szintet [14].



5. ábra. A H_2 térfogattartalom profiljának alakulása egy 1,5 m magas csőben 1 G és 300 K mellett, ahol a H_2 és a CH_4 $t = 0$ -nál teljesen rétegzett, a felső felét tiszta H_2 , az alsó felét pedig tiszta CH_4 tölti ki [13].

A hőmérséklet hatásának vizsgálata során, tekintettel arra, hogy a parciális nyomás kilométeres tartományokban a magassággal közel lineárisan változik, csak a cső felső részében és az alján kialakult parciális nyomást vizsgálták. A felső és alsó parciális nyomás közötti különbség csökkent a hőmérséklet növekedésével, ami arra utal, hogy a gáz rétegződése elenyésző magasabb hőmérsékleten, a molekulák intenzívebb Brown-mozgása miatt. Ugyanakkor, még nagyon alacsony, 150 K

hőmérsékleten is, ahol a gravitációs rétegződés kedvezőbb, a felső és az alsó p_{H_2} közötti különbség még mindig jelentéktelen ($\sim 1,2\%$).

A keverési arányok (a teljes H_2 -térfogatfrakció alapján) hatását vizsgálva azt állapították meg, hogy a két gáz normalizált parciális nyomása lineárisan korrelál az adott gázok átlagos koncentrációjával. Vagyis, a felső és az alsó p_{H_2} közötti különbség tiszta H_2 körülmények között maximalizálódik. Az 1500 m magas cső esetében 300 K hőmérsékleten a H_2 frakció maximális különbsége $\sim 2,7\%$.

A magasság növelése kitolja az egyensúly kialakulásához szükséges időt. Vegyük észre, hogy ez az idő a magasság négyzetével arányos, azaz az 1500 m-es csőben az egyensúly eléréséhez szükséges idő százszor nagyobb, mint a 150 m-es csőben. Ez azt jelenti, hogy a rétegződés termodinamikai és kinetikai megvalósíthatósága általában nem teljesíthető egyszerre, mivel a nyilvánvaló rétegződés nagy csőmagasságot igényel, ami viszont megakadályozza az egyensúly korlátozott idő alatt történő kialakulását. Vegyük figyelembe, hogy a fenti számítások a kezdetben teljesen elegyített gázkeverékeken alapulnak, és a gázok diffúziója gravitációs rétegződéshez vezet.

Egy másik helyzetben, amelyben a gázkeverékek kezdetben teljesen rétegzettek, tiszta H_2 tölti ki egy 1,5 m magas rövid cső felső felét, és tiszta CH_4 tölti ki az alsó felét, az egyensúlyi rétegződés elhanyagolható az 1,5 m-es csőben, ami azt jelenti, hogy a kezdeti rétegződés $t \rightarrow \infty$ -nél csökken.

Ha a hidrogén-földgáz keverék nagyon kis áramlási sebességgel áramlik, a hidrogén fokozatosan a csővezeték tetejére toródik és a rétegződési jelenség a csővezeték gravitációs irányában is megjelenhet, de a hidrogén-koncentráció gradiens nem jelentős. Ezenkívül, a gázkeverék rétegződése hajlamos, arra, hogy kisebb sebességgel, nagyobb nyomással, alacsonyabb hőmérséklettel és nagyobb hidrogénkeverési térfogathányaddal növekedjen. Az íveket tartalmazó csőszakaszok esetében a hidrogénrétegződés az emelkedő szakaszon jelentősebb, mint az eső szakaszon, és amikor az áramlási sebesség eléri a 10 m/s értéket, akkor a rétegződés jelensége csak az emelkedő szakaszon következik be, a többi szakasz alapvetően egyenletes eloszlású marad. A kevert hidrogén-földgáz vezeték kis nyomású és nagy sebességű helyzetbe kell állítani, és a kockázat csökkenthető [13], [15].

A rétegződéssel kapcsolatban érdemes lehet vizsgálni az Uphill-diffúzió tranzienst jelenséget, amikor az elridegedés szobahőmérsékleten sokkal hamarabb következik be, mint az várható lenne a diffúziós együtthatók szobahőmérsékletre történő extrapolációjából. A koncentráció gradiens pozitív iránya mentén történő diffúzió során a rétegződött hidrogén bejuthat a szerkezeti anyag azon helyeire, ahol már eleve nagyobb a hidrogén koncentráció, mint például a csővezetékek hegesztett kötéseiben. A hidrogénrétegződés kockázati küszöbének meghatározása – a hidrogénkoncentráció és a csővezeték acél anyagának kapcsolata alapján – további kutatásokat igényel a jövőben.

6. Összefoglalás

A tiszta energia elkerülhetetlen választás az alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaság számára. A hidrogénenergiának annyi előnye van, hogy a 21. század legígéretesebb „végső energiájának” tekintik [16]. A hidrogén nagy mennyiségben történő, távolsági szállítása és alacsony költségű tárolása azonban ma is probléma. Ezért javasolták a hidrogéngáz bekeverését a már meglévő földgázvezetékbe. Azonban, számos szempontot kell figyelembe venni a földgáz rendszerbe történő bekeverés során. A hidrogén hozzáadása a földgázhoz a földgáz tüzeléstechnikai tulajdonságainak megváltozását eredményezi, ami a rendszer elemek teljesítményének a romlását okozhatja. A szállítóvezetékek vonatkozásában a hidrogén könnyebben diffundál, ami a csővezeték anyagának elridegését, vagy gázszivárgást okoz. A hidrogén parciális nyomása fontos szempont a kevert hidrogén és földgázt tartalmazó vezeték anyagválasztásánál; a parciális nyomás szabályozása a

csővezetékek biztonságos üzemeltetésének alapja, amelyet a kevert gáz koncentráció-eloszlása befolyásol. Hidrogén hozzáadásával a földgáz-hidrogén gázkeverék koncentráció-eloszlása inhomogén lesz, amit a gravitáció, a molekuláris diffúzió és a turbulens áramlások okoznak.

Irodalom

- [1] K. Topolski *et al.*, “Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology,” 2022. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/publications>
- [2] IEA. International Energy Agency, “The Future of Hydrogen,” Paris, 2019.
- [3] T. C. Allison and S. Simons Eugene, “Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines,” 2022.
- [4] D. Vries, O. Florisson, and G. C. Tiekstra, “Safe operation of natural gas appliance fueled with hydrogen/natural gas mixtures - Progress obtained in the naturally-project,” 2007.
- [5] M. Ruth *et al.*, “The Technical and Economic Potential of the H2@Scale Hydrogen Concept within the United States,” *Golden, CO (United States)*, Oct. 2020. doi: 10.2172/1677471.
- [6] Loughborough University, “Completing Risk Assessments,” 2019.
- [7] M. W. Melaina, O. Antonia, and M. Penev, “Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues,” 2013. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [8] P. Márquez-Sobrino, P. Díaz-Cuevas, B. Pérez-Pérez, and D. Gálvez-Ruiz, “Twenty years of energy policy in Europe: achievement of targets and lessons for the future,” *Clean Technol Environ Policy*, vol. 25, no. 8, pp. 2511–2527, Oct. 2023, doi: 10.1007/s10098-023-02543-x.
- [9] B. A. Galyas and I. Szúnyog, “A hidrogén hatása a földgázhálózati gázminőségre” *Műszaki Földtudományi Közlemények*, vol. 89, no.1, pp. 221–226, 2020.
- [10] V. R. Támba and N. Nagy, “Zöld hidrogén,” *Jelenkori Társadalmi És Gazdasági Folyamatok*, vol. 18, no. Különszám, pp. 495–502, Jun. 2023, doi: 10.14232/jtgf.2023.kulonszam.495-502.
- [11] W. K. H. Kft, “19/2009. (I. 30.) Korm. rendelet a földgázellátásról szóló 2008. évi XL. törvény rendelkezéseinek végrehajtásáról – Hatályos Jogszabályok Gyűjteménye.” <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0900019.kor>
- [12] L. A. Fernandes, L. R. C. Marcon, and A. Rouboa, “Simulation of flow conditions for natural gas and hydrogen blends in the distribution natural gas network,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 59, pp. 199–213, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.014.
- [13] S. Peng *et al.*, “Equilibrium distribution and diffusion of mixed hydrogen-methane gas in gravity field,” *Fuel*, vol. 358, 2023, Art. no. 130193, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130193.
- [14] H. Barthélémy, “Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels,” *Int. J. Hydr. Ener.*, vol. 36, no. 3, pp. 2750–2758, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.029.
- [15] C. Liu *et al.*, “Study on the stratification of the blended gas in the pipeline with hydrogen into natural gas,” *Int. J. Hydr. Ener.*, vol. 48, no. 13, pp. 5186–5196, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.074.
- [16] Zou, C. “Develop a carbon neutral implementation path with “Chinese characteristics,” *Chin. J. Sci.*, vol. 6, pp. 6–9, 2021.

ALUMÍNIUMÖTVÖZETEK KLINCS KÖTÉSEINEK MECHANIKAI VIZSGÁLATAI ÉS NAGYCIKLUSÚ FÁRASZTÓVIZSGÁLATA

Kovács Péter Zoltán

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: peter.kovacs@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Abdulhakim Shukurea

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: abdulhakim.shukurea.rahmato@student.uni-miskolc.hu

Absztrakt

A bemutatott munka két alumíniumötvözet (5754-H22 és 6082-T4) nagyciklusú fáradási viselkedését vizsgálja, nyíró-szakító terhelési körülmények között, ahol a lemezek klincs kötéssel készültek. A klincselés egy gyorsan fejlődő technológia, számos ipari ágazat alkalmazza könnyűfémek összekötésére. Az ok a technológia költségghatékony és környezetbarát tulajdonságaira vezethető vissza, amely két (vagy több) lemez egymásba sajtolását jelenti, anélkül, hogy további kötőelemekre lenne szükség. A klincselés kötések kialakítása során 5754, 6082 azonos anyagminőségű alumínium lemezpárok és 5754-6082 kombinált anyagminőségű lemezpárok kerültek összekötésre, 0,5 mm-es fenékvastagsággal, TOX szerszámok segítségével. Ezt követően ismétlődő terhelésű vizsgálatokkal kerültek kiértékelésre a klincselés kötések nagyciklusú kifáradási tulajdonságai. A $\Delta L-N$ görbék úgy kerültek megszerkesztésre, hogy szemléltessék a meghibásodásig tartó ciklusok számát és az alkalmazott terhelési tartományok közötti összefüggést. A vezérlési mód állandó terhelésamplitúdójú, a terhelés aszimmetria tényező pedig a teljes vizsgálatsorozatban állandó értékű, $R = 0,1$ volt. A terhelési frekvencia értékét $f = 30$ Hz-re, a terhelési függvény alakját pedig szinuszosra választottuk, szintén a teljes vizsgálati sorozatra. Minden vizsgálatot szobahőmérsékleten és laboratóriumi körülmények között végeztünk el. A vizsgálatsorozatok eredményei értékes információkat nyújtanak az alumíniumötvözetből készült klincs kötések mechanikai tulajdonságainak megismeréséhez, mindkét terhelési körülmény esetében. Az eredmények hangsúlyozzák a kötéstervezés optimalizálásának fontosságát az alkalmazások tartósságának és megbízhatóságának növelése érdekében.

Kulcsszavak: 5754, 6082, klincselés, TOX szerszám, nyíró-szakító vizsgálat, nagyciklusú fárasztó-vizsgálat

Abstract

The presented work investigates the high-cycle fatigue behavior of two aluminum alloys (5754-H22 and 6082-T4) under shear-tensile loading conditions, where the sheets were manufactured by

clinching. Clinching is a rapidly developing technology, many industrial sectors use it to join lightweight metals. The reason can be traced back to the cost-effective and environmentally friendly properties of the technology, which involves interlocking two (or more) sheets into each other without the need for additional fasteners. During the creation of the clinched joints, pairs of aluminum sheets of the same material quality 5754, 6082 and pairs of combined material qualities 5754-6082 were joined, with a bottom thickness of 0.5 mm, using TOX tools. Subsequently, the high cycle fatigue behaviour of the clinched joints was assessed through cyclic loading tests. The $\Delta L-N$ curves were constructed to illustrate the relationship between the number of cycles to failure and the applied load range levels. The control mode was constant load amplitude, and the load asymmetry factor was constant throughout the test series, $R = 0.1$. The load frequency value was chosen to be $f = 30$ Hz and the shape of the load function to be sinusoidal, also for the entire test series. All tests were performed at room temperature and under laboratory conditions. The results of the test series provide valuable information for understanding the mechanical properties of clinched joints made of aluminum alloy, for both loading conditions. The results emphasize the importance of optimizing joint design to increase durability and reliability in applications.

Keywords: 5754, 6082, clinching, TOX tool, shear-tear test, high-cycle fatigue test

1 Bevezetés

Napjainkban a könnyűfémek felhasználása az autópárhban és a repülőgépiparban nagymértékben növekszik, köszönhetően a kiváló szilárdság-tömeg aránynak, amely javítja a teljesítményt és a hatékonyságot. A leggyakrabban használt anyagok, például az alumíniumötvözetek, a szénszálas kompozitok és a magnéziumötvözetek a nagyobb sűrűségű, hagyományos anyagokat, például az acélokat váltják fel. Ramasubramanian és Tenisz szerint [1], az alumínium autópárh alkalmazásokban történő felhasználása akár 50%-os tömegcsökkentéshez is vezethet, ami jelentősen javítja a járművek általános teljesítményét. Hasonlóképpen, a repüléstechnikában a szénszállal megerősített polimer kompozitok (CFRP) integrációja lehetővé tette a repülőgépgyártók számára, hogy csökkentsék a szerkezet súlyát, miközben megőrizték vagy növelték a biztonságot és a tartósságot, így támogatva az iparág innovációs és hatékonysági törekvéseit [2].

A könnyűfémek járművekre gyakorolt hatása az, hogy ennek következtében csökken a tömegük, így csökken az üzemanyag-fogyasztás és az üvegházhatású gázok kibocsátása. Számos tanulmányban, köztük a Singh [3] által végzett kutatásban is kimutatták, hogy egy jármű tömegének még kismértékű csökkenése is jelentős javuláshoz vezethet az üzemanyag-hatékonyságban. Például a jármű tömegének 10%-os csökkentése 6-8%-os üzemanyag-fogyasztási javulást eredményezhet, kiemelve az anyagválasztás kritikus szerepét a fenntarthatósági célok elérésében. Ezenkívül, az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának csökkentésére irányuló szabályozási nyomás felgyorsította a könnyűfémek felé történő elmozdulást, ami arra készítette a gyártókat, hogy olyan új tervezési stratégiákat fogadjanak el, amelyek a tömegcsökkentést helyezik előtérbe, miközben betartják a környezetvédelmi előírásokat.

Az alumíniumötvözetek, különösen az 5754-H22 és a 6082-T4 autópárhban való alkalmazása jelentős vonzerőre tett szert a mechanikai tulajdonságok és a tömegcsökkentési potenciál kiváló kombinációja miatt. A jó korrózióállóságáról és hegeszthetőségéről ismert 5754-H22-t túlnyomórészt könnyű alkatrészek, például karosszériaelemek és szerkezeti megerősítések gyártásában használják, hatékonyan hozzájárulva az üzemanyag-takarékossághoz és a jármű általános teljesítményéhez [4]. A 6082-T4 anyagminőség nagyobb szilárdsággal és fokozott megmunkálhatósággal jellemezhető,

amelyek miatt gyakran alkalmazzák a nagyobb igénybevételeknek kitett helyeken, például az alvázaknál és a teherhordó szerkezeteknél [5].

Az autóipar a könnyűfém lemezek összekötésére különböző innovatív módszereket alkalmaz, amelyek az alumíniumötvözetek, a magnéziumötvözetek és az erősített kompozitok esetében megoldják az anyagok által támasztott egyedi kihívásokat. A hagyományos hegesztési technikák gyakran kudarcot vallanak ezen anyagok termikus tulajdonságaiban és olvadáspontjában mutatkozó különbségek miatt, ezért olyan alternatív összekötési módszereket alkalmaznak, mint a ragasztás, a mechanikus kötések és a klincs kötés. A ragasztás azáltal vált népszerűvé, hogy képes egyenletesen elosztani a terhelést és csökkenti a feszültségkoncentrációt, ezáltal javítja a szerkezeti integritást [6]. A mechanikus kötések, beleértve a szegecseket és a csavarokat is, megbízhatóságot biztosítanak, de növelhetik a tömeget, amely alapos átgondolást tesz szükségessé a tervezés során [7]. A klincselés hatékony módszerként jelent meg vékony alumíniumlemezek és más könnyű anyagok összekapcsolására, anélkül, hogy hőre vagy további elemekre lenne szükség, csökkentve a tömeget és javítva az energiahatékonyságot [8]. Összességében ezek a fejlett kötési technikák tükrözik az autóipar azon folyamatos erőfeszítéseit, hogy optimalizálják az anyagok teljesítőképességét, miközben megőrzik a szerkezeti integritást és csökkentik a jármű össztömegét.

A klincselés egy széles körben alkalmazott mechanikai kötési módszer, amely számos előnnyel jár, beleértve a kisebb tömeget, a költséghatékonyságot és a környezeti fenntarthatóságot. Mivel az autóipar és a repülőgépipar egyre inkább előtérbe helyezi a könnyűfémeket, az alumíniumötvözetek népszerűvé váltak kiváló szilárdság-tömeg arányuk és korrózióállóságuk miatt. A klincselés magában foglalja az anyagok alakítását, és ezáltal a megfelelő alámetszéssel rendelkező kötések további anyagok hozzáadása nélkül. Ez a folyamat jellemzően három fő szakaszból áll: a lemez előkészítéséből, a bélyeg és matrica szerszám alkalmazásából, valamint a végső kötési műveletből. A klincselés kötések mechanikai tulajdonságait számos tényező befolyásolja, többek között a kötés geometriája, az anyagok vastagsága és az alkalmazott alumíniumötvözet [9]–[11]. Bebizonyosodott, hogy egyes alkalmazásokban, különösen vékony lemezek összekötésekor, jobban teljesít a klincselés, mint a hagyományos kötési módszerek közül például a hegesztés [12]. Különböző anyagok összekapcsolására való képessége, különösen a több anyagból álló szerkezetekben, növeli a felhasználhatóságát a feldolgozóiparban.

A klincselés kötések szakítószilárdsága kritikus paraméter, amely meghatározza a szerkezeti alkalmazásokra való alkalmasságukat. Számos tanulmányt [8], [13]–[15] készítettek az alumínium kötések nyíró-szakító teherbírásának növelésére. Zhang [16] kiterjedt vizsgálatokat végzett különféle kötési geometriákkal, és azt találta, hogy az átfedési hossz növekedése nagyobb szakítószilárdságot eredményez. Ezenkívül, a húzóterheléssel kapcsolatos meghibásodási módokat adhéziós, kohéziós és alapanyag hibákba sorolták. Ezen módok megértése elengedhetetlen a kötések kialakításának optimalizálásához. Buffa szerint [17] a kohéziós tönkremenetel az elégtelen határfelületi érintkezésű kötésekben jellemző, amely jelzi a megfelelő kötés kialakítás fontosságát.

A kifáradás egy másik kritikus szempont, amely befolyásolja a klincselés kötések megbízhatóságát. A valós alkalmazásokban a kötések által elviselt ciklikus terhelés kifáradási hibához vezethet, amelyet gyakran a kötés határfelületén fellépő feszültségkoncentráció okoz. Az összekapcsolt kötések fáradási élettartamát jelentősen befolyásolják az olyan tényezők, mint a terhelés gyakorisága, a feszültség amplitúdója és a kötés geometriája [18]. A terhelési tartomány-tönkremeneteli ciklusszám ($\Delta L-N$) görbét használják a kifáradási ellenállás értékelésére; Lei [19] szerint az alumíniumból készült kötések kifáradási határa a kötés kialakításától és az anyag tulajdonságaitól függően igen eltérő lehet.

Munkájuk a fázisvizsgálat átfogó megközelítésének szükségességét hangsúlyozza, amely magában foglalja a statikus és a dinamikus terhelési feltételeket is.

A nagy szilárdságú alumíniumötvözetek növekvő felhasználása miatt a különböző iparágakban, ezeknek az anyagoknak a kötési módszerei a legtöbb kutató számára érdekes kutatási területté válnak. Számos tanulmány részletesen vizsgálta a klincselte kötések nyíró-szakító teherbíró képességét. Továbbá vizsgálni kell ezeknek az anyagoknak a nagyciklusú fáradási viselkedését, különösen húzó terhelési körülmények között. Jelen cikk ezt a hiányosságot kívánja pótolni két alumíniumötvözet, az 5754-H22, a 6082-T4 és a kettő kombinációjának kvázi-statisztikus és nagyciklusú fáradási viselkedésének vizsgálatával.

2 Vizsgálati anyagok és módszerek

2.1 Az alkalmazott anyagminőségek jellemzői

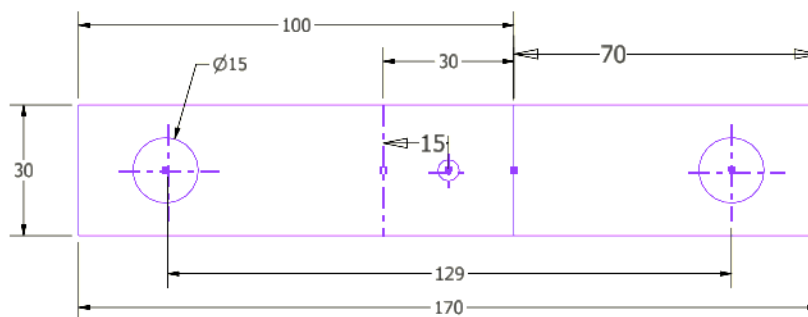
A vizsgált 1 mm vastagságú alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságait MTS típusú elektrohidraulikus, univerzális anyagvizsgáló rendszerrel határoztuk meg. Az egyes anyagminőségekre kapott eredményeket az 1. táblázatban mutatjuk be.

1. táblázat. A vizsgált alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságai.

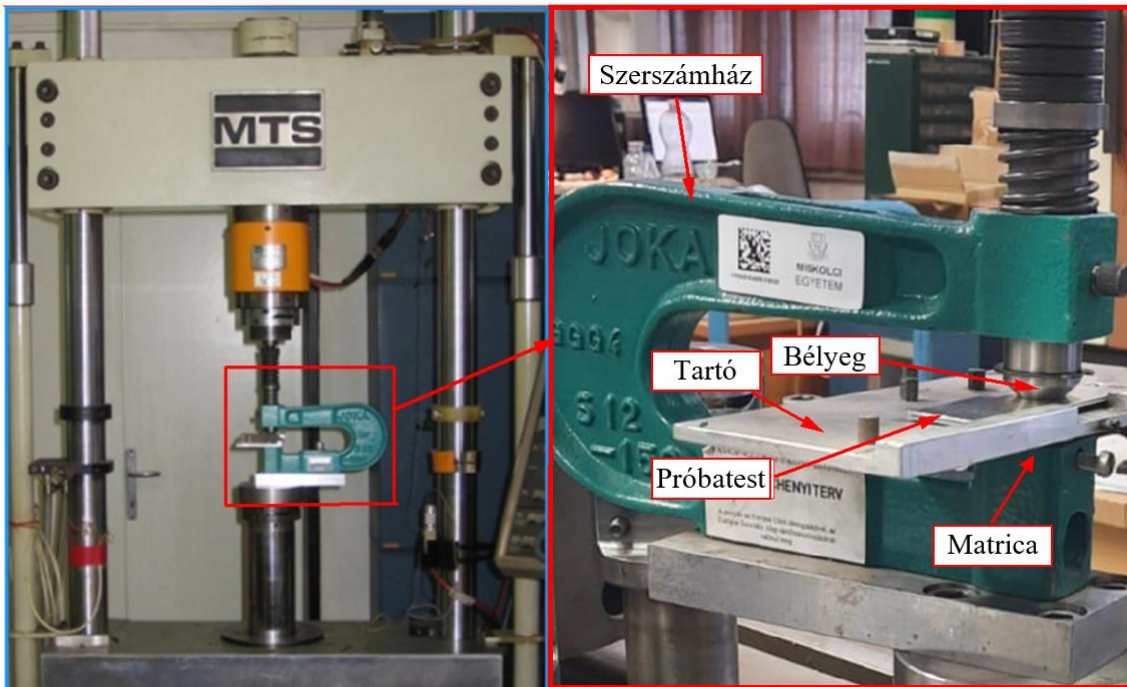
Anyagminőség	Szakító-szilárdság [MPa]	Folyáshatár [MPa]	Százalékos szakadási nyúlás [%]	Rugalmassági modulus [GPa]	Poisson szám [-]
5754-H22	281	166	22	72	0,3
6082-T6	348	303	15	72	0,3

2.2 Minta előkészítés

A klincs kötések, amelyek geometriai jellemzői az 1. ábrán láthatók, az MTS rendszerre szerelt TOX szerszámmal készítettük el, szállítási állapotú 5754-H22 és 6082-T6 alumíniumötvözetekből. Az MTS rendszerre szerelt szerszám a 2. ábrán látható. A nyíró-szakító vizsgálatokhoz öt-öt klincselte kötést használtunk, minden vizsgálatosorozathoz, biztosítva a következetes és megbízható eredményeket. Ez az átfogó megközelítés lehetővé teszi a klincselte kötések tulajdonságainak alapos elemzését, különböző terhelési feltételek mellett.



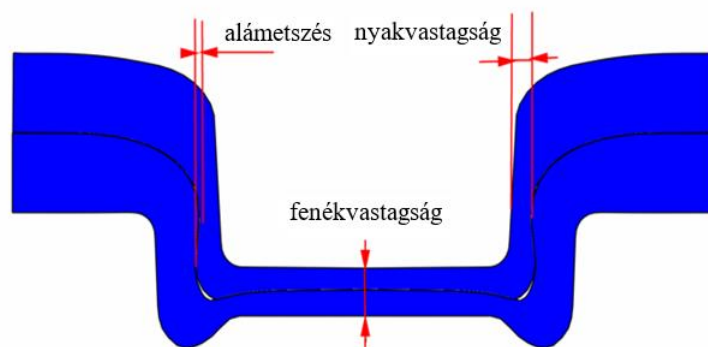
1. ábra. Klincs kötések kialakítása és méretei.



2. ábra. Klincs kötések elkészítése.

2.3 Technológiai paraméterek értékelési módszerei

A klincselt kötés általános minőségét és kötési szilárdságát jelentősen befolyásolja a nyakvastagság és az alámetszett tartomány vastagsága, így ezek kritikus technológiai paraméterek. A 3. ábrán látható, a nyakvastagság, ahol a két anyag a legszorosabban kapcsolódik egymáshoz, ez létfontosságú szerepet játszik a terheléelosztásban és a nyíróerők ellenállásában. Eközben az alámetszés befolyásolhatja a kötések azon képességét, hogy ellenálljon a különféle igénybevételeknek. Ezen jellemzők megértésével és pontos mérésével jobban megbecsülhetjük a klincselt kötés teljesítményét különböző körülmények között, és javíthatjuk a kialakítását a nagyobb megbízhatóság és tartósság érdekében.

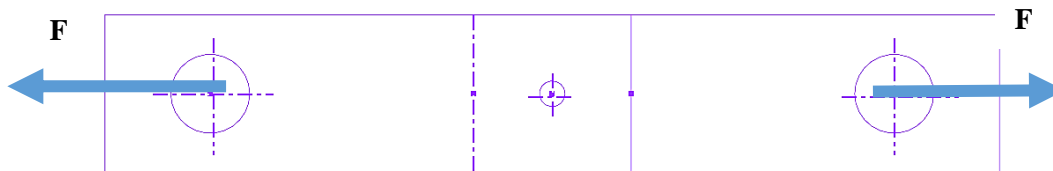


3. ábra. A klincselt kötés keresztmetszete.

A klincselt kötések nyakának és alámetszésének vastagságát AxioVision LE Rel.4.1 programmal mértük. A szoftver a mikroszkóppal rögzített képen lehetővé teszi a jellemző paraméterek részletes megfigyelését és pontos mérését. Ez a módszer biztosítja, hogy a középen elvágott kötések metszeti képein nagy pontossággal mérjünk, ami döntő fontosságú a kötés szerkezeti integritásának az értékelésében.

2.4 Nyíró-szakító vizsgálat

A kvázi-statisztikus vizsgálatokat azért végeztük el, hogy nyíró-szakító vizsgálatokkal alaposan megvizsgáljuk a klincs kötések kötési szilárdságát. Ezekre a vizsgálatokra is az MTS rendszeren került sor, a próbatestek terhelése a 4. ábrán látható. A vizsgálat során 1 mm/s alakítási sebességet alkalmaztunk; a mérések során rögzítettük a maximális nyíró-szakító terheléseket. Ez a módszer lehetővé teszi a maximális terhelés megismerését, amelynek a kötés képes ellenállni, mielőtt eltörik.



4. ábra. A klincselt kötés terhelési módja.

2.5 Klincs kötések kifáradási viselkedése

A klincselt kötések nagyciklusú fáradási viselkedését állandó terhelésamplitúdóval vizsgáltuk, az MTS rendszer segítségével. A ΔL -N görbék a meghibásodásig tartó ciklusok száma és az alkalmazott terhelési szintek közötti összefüggés szemléltetésére készültek. A vizsgálatok során a terhelésarány állandó volt ($R = 0,1$), és szinuszos terhelési függvényt alkalmaztunk, 30 Hz-es frekvenciával.

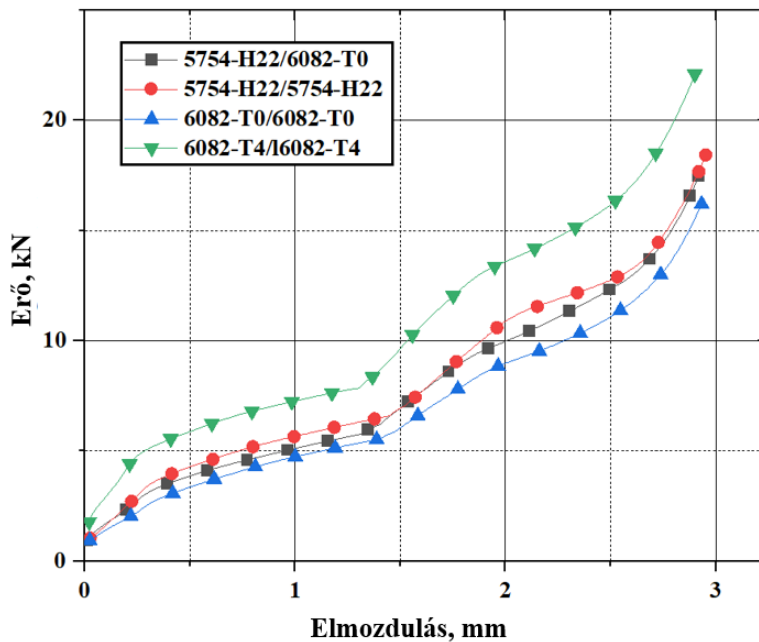
3 Eredmények

3.1 Szakítóvizsgálati jellemzők

Az 5754-H22 / 6082-T6 anyagminőségű lemezek összeillesztése során repedés volt megfigyelhető a létrehozott pontkötések feje körül, ezért a 6082-T6 anyagminőség legnagyobb keménységű szállítási állapotában (T6) nem volt klincselhető. A 6082-T0 állapotú ötvözetek kötési folyamata hőkezelést tartalmazott, ahol az ötvözetet 480°C-os hőmérsékleten 15 percig kemencében hőkezeltük, majd ezt követően gyorsan lehűtöttük vízben, így kialakítva a 6082-T0 lágyított (T0) állapotot. A 6082-es anyagminőség keménysége T0 állapotban az 5754-H22-es állapotú anyagminőség keménysége alá csökkent. A 6082-es anyagminőségű lemezek négy hetes öregedés után T4 állapotba kerültek, amely hatására a keménységük a szállítási állapot (T6) alatti értékére változott, és az 5754-H22-es anyagminőség keménységértéke fölélt volt.

Az 5. ábra bemutatja az alakítás során fellépő erőket az elmozdulás függvényében. Az egyes görbék a különböző kötéstípusok átlag értékeit szemléltetik. A hőkezelt lemezeket laboratóriumi hőmérsékleten 1 napon kötöttük össze (klincseljük) a nyíró-szakító vizsgálatokhoz. A kötések kialakítása során vizsgáltuk azt a lehetőséget is, amikor négy hét utáni öregedett állapotban készítettük

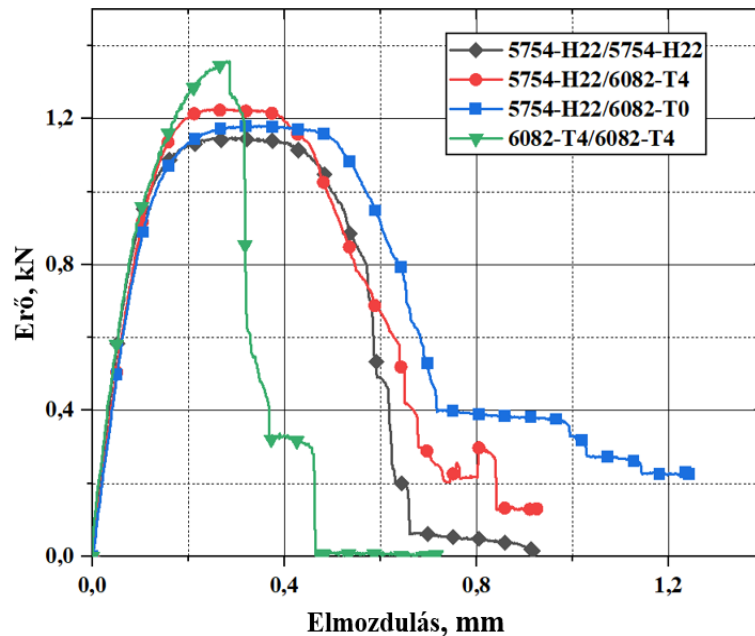
el a 6082-es anyagminőségű T4 állapotú lemezek kötéseit. A vizsgált klincs kötések közül a legnagyobb alakítóerőt a 6082-T4 / 6082-T4 alumíniumötvözetek esetében regisztráltuk az anyag négy hetes öregedése miatt, mivel ezek szilárdsága volt a legnagyobb. Az így létrehozott kötések fejei nem repedtek meg. A vizsgált klincs kötések közül a legkisebb alakítóerőt a 6082-T0 / 6082-T0 alumíniumötvözetek esetében regisztráltuk az anyag kisebb szilárdságának és ennek köszönhetően jobb alakíthatóságának köszönhetően.



5. ábra. A különböző anyagminőségek klincs kötéseinek létrehozása során kapott átlagos erő-elmozdulás diagrammok.

Az 5. ábra azt is mutatja, hogy az 5754-H22 / 5754-H22 és az 5754-H22 / 6082-T0 anyagpárak átlagos erő-elmozdulás görbéje meglehetősen hasonló volt. Az 5754-H22 / 6082-T0 anyagpár kialakításához szükséges alakítóerő kisebb volt, mint az 5754-H22 / 5754-H22 anyagpáré. A szilárdságbeli különbség ellenére ezeknek a kötéseknek az alakítási erő lefutásai hasonlóak voltak a többi anyagnál megfigyelthez. Ez arra utal, hogy míg a mechanikai tulajdonságok az ötvözetek között változnak, az illesztési folyamat viszonylag stabil alakítóerőt tart fenn a különböző anyagkombinációk esetében.

A 6. ábrán a különböző anyagpárak klincs kötéseinek nyíró-szakító vizsgálata során kapott átlagos erő-elmozdulás diagrammok láthatóak. A négy összeillesztett kötésváltozatot az 5754-H22 / 5754-H22, az 5754-H22 / 6082-T0, az 5754-H22 / 6082-T4 és a 6082-T4 / 6082-T4 állapotú anyagminőségek kombinációja adta. A legnagyobb kötési szilárdságot a 6082-T4 / 6082-T4 anyagminőségű lemezpárak esetében kaptuk, amelyek egyúttal a legnagyobb keménységértékeket is mutatták. Az 5754-H22 / 5754-H22 lemezpárak kombinációja adta a legkisebb kötési szilárdságot. Az 5754-H22 / 6082-T4 kötések szilárdsági tulajdonságai azonban valamivel magasabbak volt, mint a 5754-H22 / 6082-T0 kötéseké, az anyag négy hetes öregedése miatt megnövekedett szilárdsági tulajdonságai miatt.



6. ábra. A különböző anyagminőségek klincs kötéseinek nyíró-szakító vizsgálata során kapott átlagos erő-elmozdulás diagrammok.

3.2 Alumíniumötvözetek technológiai paramétereinek és kötési szilárdságának kapcsolata

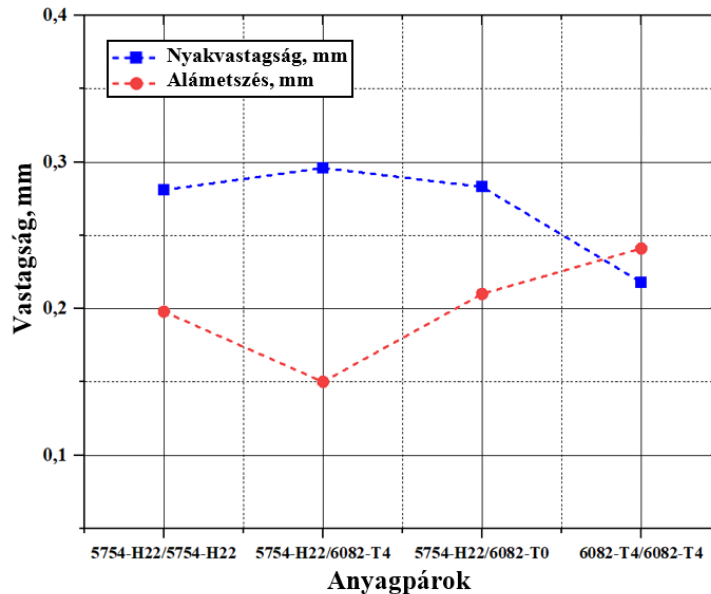
A 7. ábrán megfigyelhető, hogy az 5754-H22 / 6082-T0 anyagminőségű kötés nyakvastagsága közel azonos volt az 5754-H22/5754-H22 anyagminőségű kötéséhez. Ez annak köszönhető, hogy a 6082-T6 állapotú ötvözetek hőkezelési folyamaton mentek keresztül, amely a különböző anyagminőségű anyagokat közel azonos keménységi állapotba hozta. Az oldalfalak megnövekedett nyakvastagsága növelheti az kötések nyíró-szakító teherbíró képességét azáltal, hogy megnöveli a hasonló érintkezési felületeket és a mechanikus alámetszést, ami nagyobb szakítószilárdságot eredményez.

Az 5754-H22 / 6082-T4 alumíniumötvözetek klincselte kötésnél mértük a legalacsonyabb alámetszési értéket, aminek az az oka, hogy a 6082-T4 alumíniumötvözetek rosszabb alakíthatósággal rendelkeznek és ezért megakadályozzák az anyag felhalmozódását az alámetszési terület közelében. Az alámetszés nagysága az 5754-H22 / 6082-T0 állapotú lemez klincselésével javult. A legnagyobb alámetszést és legkisebb nyakvastagságot a 6082-T4 / 6082-T4 anyagnál figyeltük meg.

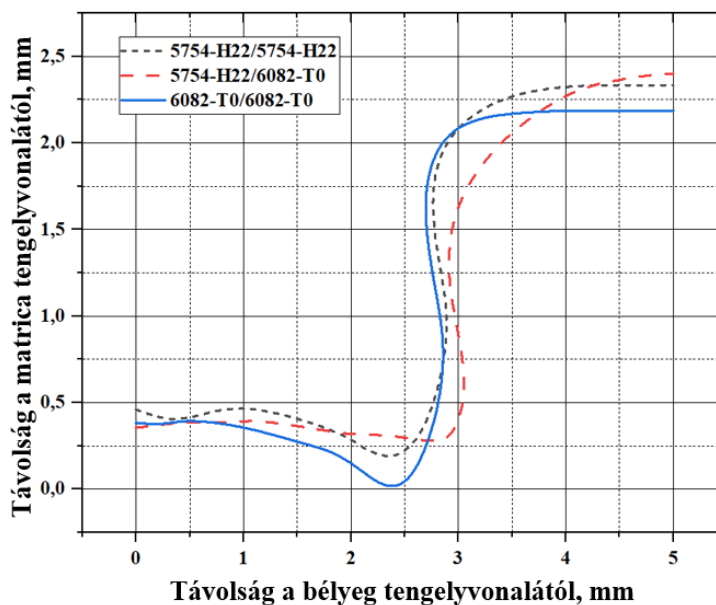
Az alámetszés vastagságának nincs nagymértékű hatása a szakítószilárdságra, viszont nagymértékben befolyásolhatja a klincselte kötések keresztirányú húzó teherbíró képességét. A nyakvastagság optimalizálható a jobb teljesítmény érdekében a klincselte kötések tervezésével és gyártásával.

Az anyag alakíthatósága kulcsfontosságú tényező az anyagáramlás szabályozásában, azért, hogy létrejöjjön a megfelelő alámetszés a két lemez között. Három anyagminőség kombinációt választottunk ki annak érdekében, hogy megvizsgáljuk azok hatását a TOX szerszámban kialakított klincselte kötések alámetszéseire. A 8. ábrán különböző alumíniumötvözetek klincselte kötésének kötési alakjai láthatók. Az alámetszéseket, vagy „S”-alakokat, három kötési alakban vizsgáltuk. Az „S”-alakzatok középső, alámetszett része az 5754-H22 / 5754-H22 és az 6082-T0 / 6082-T0 esetében

szinte teljesen megegyezik, csak az „S”-alakzatok felső és alsó része tér el kismértékben az anyagok eltérő keménysége miatt. Az 5754-H22 / 6082-T0 kötés azonban más utat mutat, mint az azonos anyagminőségű kötésekben kialakított alakzatok. Ennél a kombinált anyagminőségű kötésnél a 6082-T0 állapotú lemeznél a hőkezelés jelentősen befolyásolta az egymásba illeszkedő formát, végső soron javítva a keményebb anyagok összeilleszthetőségét.



7. ábra. Nyak- és alámetszés vastagságok különböző alumíniumötvözetekhez.



8. ábra. Az alumíniumötvözetek alakzárásainak összehasonlítása.

3.3 Nagyciklusú fárasztóvizsgálatok

A ΔL -N görbék ábrázolják a kapcsolatot a tönkremenetelig tartó ciklusok száma és a terhelés tartományának értékei között, különböző anyagpárosítású klincselte kötések esetén. A ΔL -N görbéket fél-logaritmikus skálán szerkesztettük meg, a vizsgálati eredmények alapján, a legkisebb négyzetek módszerének (LSM) alkalmazásával. Az 50%-os túlélési valószínűséghez tartozó ΔL -N görbék főbb jellemzőit a Basquin-típusú [20] egyenlet felhasználásával a 2. táblázatban találjuk, ahol az egyenlet a következő alakú:

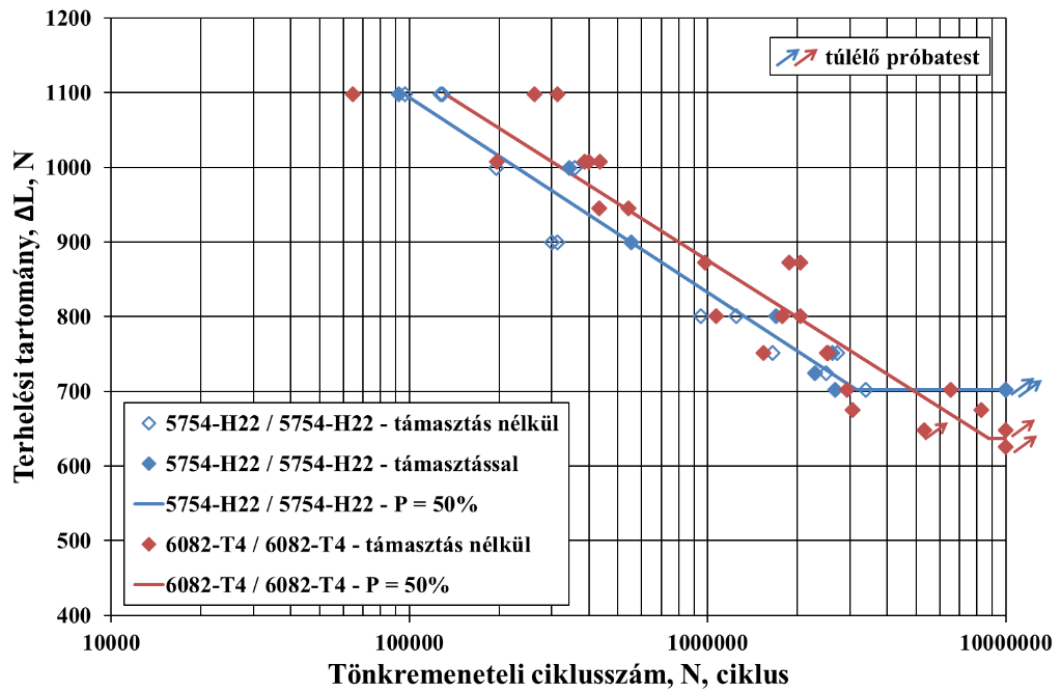
$$\Delta L = A * \ln(N) + B. \quad (1)$$

2. táblázat. A Basquin-típusú egyenleten alapuló, 50%-os túlélési valószínűséghez tartozó ΔL -N görbék jellemzői.

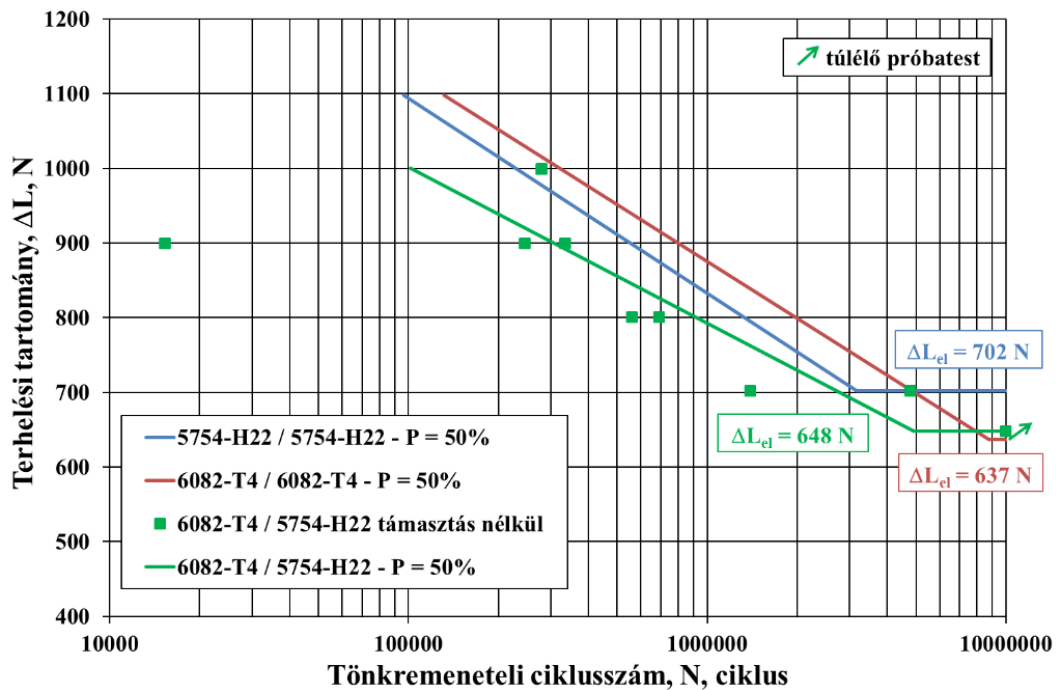
Anyagkombinációk	A	B	Korrelációs együttható [-]	ΔL_{el} [N]
6082-T4 / 6082-T4	-109,8	2392	0,928	637
5754-H22 / 5754-H22	-113,4	2399	0,974	702
6082-T4 / 5754-H22	-90,8	2047	0,871	648

A 9. ábra szemlélteti a mért értékeket és a ΔL -N görbéket az azonos anyagminőségű 5754-H22 / 5754-H22 és 6082-T4 / 6082-T4 klincselte kötésekénél, ahol a nyilak a túlélő próbatesteket mutatják. A terhelési amplitúdó csökkenésével a ciklusszám növekszik. Az 5754-H22 / 5754-H22, illetve 6082-T4 / 6082-T4 klincselte kötések kifáradási határai 702 N, illetve 637 N. Az azonos anyagkombinációjú kötések összehasonlítva megállapítható, hogy az 5754-H22 anyagminőségű lemezekből készített kötések felülmúlták a 6080-T4 anyagminőségű lemezekből készített kötésekét. Ez rávilágít az azonos 5754-H22 anyagminőségű klincselte kötésekben rejlő potenciálra, mind a tartósság növelésében, mind pedig a teljesítmény fokozásában. Az azonos anyagminőségű 5754-H22 lemezek klincselte kötéseinek fárasztóvizsgálatainál vizsgáltuk a próbatestek befogásának hatását is. Az elkészített kötések vizsgálatát kétféle befogási módban is elvégeztük. Az egyik esetben az egytengelyűség megvalósításához szükséges támasztó lemezeket alkalmaztunk a próbatestek befogása során, míg a másik esetben ezek nélkül végeztük a vizsgálatokat. Ahogyan azt a 9. ábrán láthatjuk, a támasztó lemezek alkalmazása vagy azok elmaradása nem volt szignifikáns hatással a kötések nagyciklusú fáradással szembeni viselkedésére.

A 10. ábra az azonos és a kombinált anyagminőségű klincselte kötések nagyciklusú fáradási sajátosságait mutatja, a kifáradási határ értékek számszerű feltüntetésével, feltárva a teljesítményben tapasztalható különbségeket. A kombinált anyagminőségek klincselte kötéseinek kifáradási határa 648 N-on volt, amely lényegesen alacsonyabb, mint az 5754-H22 azonos anyagminőségű lemezek kötéseié (702 N). A tartósságra vonatkozó korlátok rávilágítanak egy adott alumíniumötvözet választásának előnyeire a kötési alkalmazásokhoz, különösen olyan szerkezeti elemek esetében, amelyeknél hosszú ideig tartó, megbízható teljesítményre – esetünkben nagyciklusú fáradással szembeni ellenállásra – van szükség.



9. ábra. Mérési eredmények és ΔL -N görbék azonos anyagpárok klincselte kötésénél.



10. ábra. Mérési eredmények kombinált kötésekre és az összes elvégzett vizsgálat ΔL -N görbéje.

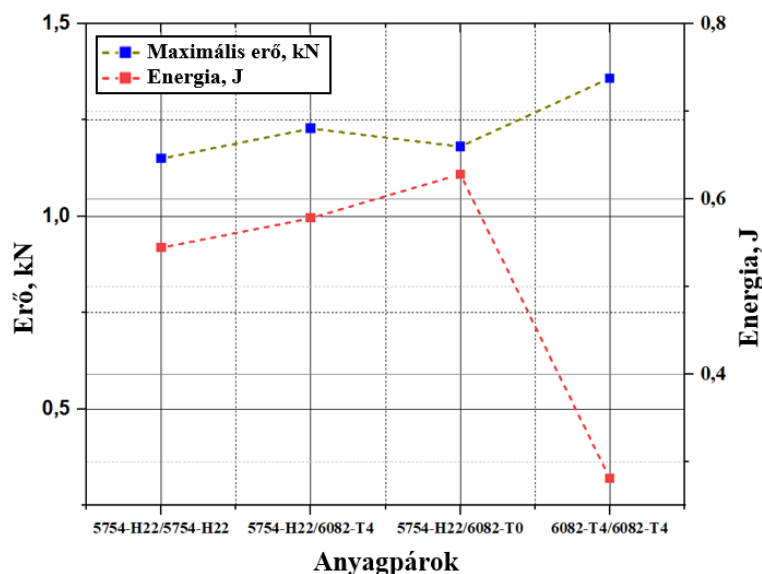
3.4 Energiaelnyelés

A tanulmány keretében megvizsgáltuk a két különböző alumíniumötvözetből készült klincs kötések energiaelnyelési jellemzőit, négy különböző kötés konfigurációt (5754-H22 / 5754-H22, 5754-H22 / 6082-T4, 5754-H22 / 6082-T0 és 6082-T4 / 6082-T4) elemezve, annak érdekében, hogy megértsük, hogyan hatnak ezek a változók az általános teljesítményre. A két ötvözet, négy különböző kombinációjú kötéseinek az energiaelnyelését a 3. egyenlet segítségével vizsgáltuk.

$$E = \int_0^{u_f} F_s du , \quad (2)$$

ahol E az energiaelnyelés, u_f és F_s pedig a tönkremenetelhez tartozó elmozdulás és nyíró-szakító terhelés.

A 11. ábrán a legnagyobb energiaelnyelést az 5754-H22 / 6082-T0 anyagpárnál figyeltük meg, míg a legalacsonyabbat a 6082-T4 / 6082-T4 konfigurációban. Az alacsony energiaelnyelési képesség a nagyobb szilárdsági tulajdonságok miatt következhetett be. Az eredmények használható információkat nyújthatnak a kötéstervek optimalizálásába, a szerkezet rugalmasságának növelése érdekében, amely potenciálisan hatékonyabb anyagfelhasználást és nagyobb biztonságot eredményezhet a gyakorlati alkalmazásokban.



11. ábra. A különböző anyagpárosítású klincsel kötések energiaelnyelése.

4 Következtetések

Ebben a tanulmányban kísérleti módszerekkel vizsgáltuk az azonos és a kombinált anyagminőségű alumínium lemezekből készített klincsel kötések szilárdsági és kifáradási tulajdonságait. Az eredmények alapján a következő főbb következtetések vonhatók le.

- A klincsel kötések nyíró-szakító szilárdságát jelentősen befolyásolja a nyakvastagság, míg az alámetszés vastagságának nincs szignifikáns hatása arra.

- Az 5754-H22 és a 6082-T4 anyagok összekapcsolása a 6082-T6 hőkezelésével javult, amely jobb nyakvastagságot eredményezett és javult a kötések energiaelnyelő képessége.
- A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei megmutatják, hogy a vizsgálatok során alkalmazott támaszték nem befolyásolja szignifikánsan a klincselte kötések fárasztó igénybevételre szembeni ellenállását.
- Az 5754-H22 azonos anyagminőségű alumíniumötvözet kötések jobban teljesítettek, mint a 6082-T4 azonos anyagminőségű kötések, ahol a kifáradási határok értékei 702 N, illetve 637 N voltak.
- A kombinált 5754-H22 / 6082-T4 anyagminőségű kötések kifáradási határa 648 N, ami alacsonyabb, mint az 5754-H22 azonos anyagminőségű kötéseké.
- A legnagyobb energiaelnyelést az 5754-H22 / 6082-T0 anyagpárosításnál, míg a legkisebb energiaelnyelő képességet a 6082-T4 / 6082-T4 anyagpárosításnál tapasztaltuk.

Irodalom

- [1] S. Ramasubramanian and K. Tennis, "Lightweight material for weight reductions in an automotive suspension part lower link," *Materials Today: Proceedings*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.304>
- [2] M. K. Gupta and V. Singhal, "Review on materials for making lightweight vehicles," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 868–872, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.517>
- [3] H. Singh, G. Singh Brar, H. Kumar, and V. Aggarwal, "A review on metal matrix composite for automobile applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 320–325, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.670>
- [4] D. F. O. Braga, S. M. O. Tavares, L. F. M. Da Silva, P. M. G. P. Moreira, and P. M. S. T. De Castro, "Advanced design for lightweight structures: Review and prospects," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 69, pp. 29–39, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.03.003>
- [5] W. Zhang and J. Xu, "Advanced lightweight materials for Automobiles: A review," *Materials & Design*, vol. 221, Sep. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>
- [6] J. Wang, Y. Yu, C. Fu, H. Xiao, H. Wang, and X. Zheng, "Experimental investigation of clinching CFRP/aluminum alloy sheet with prepreg sandwich structure," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 277, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116422>
- [7] P. Geng et al., "Improving bonding strength of Al/CFRTP hybrid joint through modifying friction spot joining tools," *Composites Part B: Engineering*, vol. 254, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110588>
- [8] K. Aydin, M. Hıdırođlu, and N. Kahraman, "Enhancing weld strength in high-strength steels: the role of regional preheating in RSW," *Materials Testing*, vol. 66, 2024, <https://doi.org/10.1515/mt-2023-0241>
- [9] F. Lambiase and A. Di Ilio, "Damage analysis in mechanical clinching: Experimental and numerical study," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 230, pp. 109–120, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.013>
- [10] P.-C. Lin, J.-W. Lin, and G.-X. Li, "Clinching process for aluminum alloy and carbon fiber-reinforced thermoplastic sheets," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 529–541, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1960-7>
- [11] A. Shukurea Rahmato and P. Z. Kovács, "Effects of Tool Geometry Parameters on Clinched Joint Strength Using FEM," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2848, no. 1, 2024, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2848/1/012009>

- [12] Ľ. Kaščák, J. Slotá, J. Bidulská, R. Bidulsky, and A. Kubit, “Experimental investigation of joining the metal/polymer/metal composite sheets by clinching method,” *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 29, no. 4, pp. 214-218, 2023, <https://doi.org/10.36547/ams.29.4.1979>
- [13] Y. Abe, K. Mori, and T. Kato, “Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 4, pp. 884–889, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.11.015>
- [14] M. K. S. Atia and M. K. Jain, “Finite element analysis of material flow in die-less clinching process and joint strength assessment,” *Thin-Walled Structures*, vol. 127, pp. 500-515, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.03.001>
- [15] L. Ewenz, M. Kuczyk, and M. Zimmermann, “Effect of the tool geometry on microstructure and geometrical features of clinched aluminum,” *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 5, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100091>
- [16] Y. Zhang, H. Xu, R. Peng, Y. Lu, and L. Zhu, “The State of the Art of Finite Element Analysis in Mechanical Clinching,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 1191–1214, 2022, <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00366-z>
- [17] G. Buffa et al., “Joining by forming technologies: current solutions and future trends,” *International Journal of Material Forming*, vol. 15, no. 3, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01674-8>
- [18] M. Carboni, S. Beretta, and M. Monno, “Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, no. 2, pp. 178–190, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2005.04.004>
- [19] L. Lei, X. He, T. Yu, and B. Xing, “Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials,” *Thin-Walled Structures*, vol. 144, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106281>
- [20] O. H. Basquin, “The Exponential Law of Endurance Tests,” *American Society for Testing and Materials*, vol. 10, pp. 625–630, 1910

FINOMLEMEZEK EGYTENGELYŰ CIKLIKUS HÚZÓ-NYOMÓ VIZSGÁLATÁRA ALKALMAS MÉRŐKÉSZÜLÉK TERVEZÉSE

Lukács Zsolt

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsolt.lukacs@uni-miskolc.hu

Gál Gaszton György

Címzetes egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: gaszton.gyorgy.gal@uni-miskolc.hu

Jemal Ebrahim Dessie

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: dessie.jemal.ebrahim@student.uni-miskolc.hu

Absztrakt

Nagyszilárdságú autóiipari alumíniumötvözetek visszarugózásának numerikus modellezéséhez elengedhetetlen az ezzel összefüggő matematikai egyenletek anyagparamétereinek fizikai mérésekre alapozott meghatározása. Ehhez ún. egytengelyű ciklikus húzó-nyomó vizsgálatok kivitelezése szükséges, ahol a nyomó igénybevételi tartományban a próbatest kihajlásának megakadályozását biztosítani kell. Cikkünkben egy új kialakítású mérőkészülék tervezési folyamatát mutatjuk be.

Kulcsszavak: visszarugózás, geometriai kompenzáció, ciklikus húzó-nyomó vizsgálat, kihajlást megakadályozó mérőkészülék

Abstract

For numerical modelling of the springback of automotive high-strength aluminium alloys, it is essential to determine the material parameters of the related mathematical formulas based on physical measurements. This requires the implementation of so-called uniaxial cyclic tension-compression tests, where the prevention of specimen buckling in the compressive loading range shall be ensured. In this paper, the design process of a new construction of anti-buckling device was described.

Keywords: springback, geometrical compensation, cyclic tension-compression test, anti-buckling device

1. Bevezetés

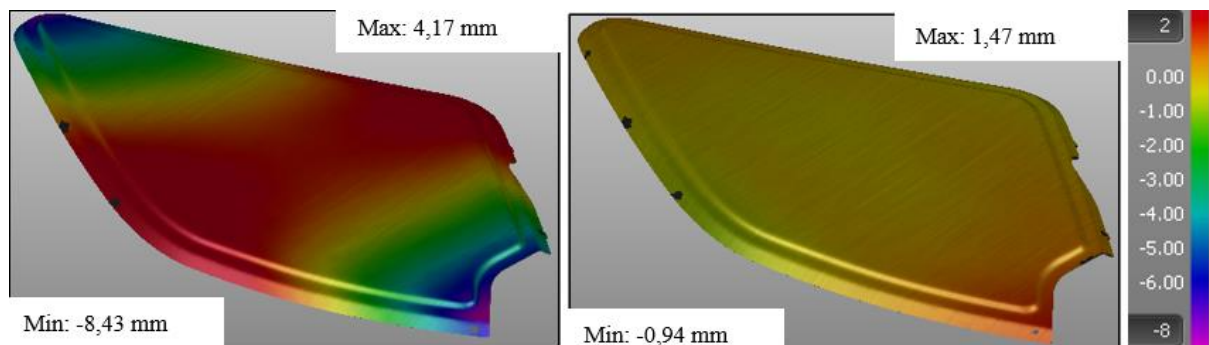
Lemezalkatrészek szerszámnyitás utáni visszarugózása következtében bekövetkező alakváltozás jól ismert kihívás a lemezalakító szerszámok tervezése során. E probléma egyszerűen kezelhető a visszarugózási érték ismeretében az alkatrész ún. túlhajlításával. Ez szabad hajlítások során viszonylag könnyen kivitelezhető, de hajlító-, alakító szerszám esetén a szerszám előzetes legyártása előtt

információval kell rendelkezni a lemez szerszámnyitás utáni alakjáról, hogy ennek ismeretében az ún. visszarugózási kompenzációval módosított szerszámfelületeket állítsunk elő.

Egyszerű geometriák esetén, az alakítástechnológiában felhalmozott tapasztalatok alapján, a visszarugózott alak az anyagminőség és a geometriai méretek ismeretében jó közelítéssel meghatározható, de bonyolult geometriák esetén már nem alkalmazhatók ezen egyszerű kompenzációs formulák.

E problémák kezelésére az alakítási folyamatok numerikus modellezése több évtizede ad megfelelő megoldást. A geometriai kompenzáció a területre fókuszáló programok mindegyikében megtalálható. A numerikus modellezés azonban megköveteli az anyag viselkedését leíró matematikai-mechanikai modellek ismeretét. Általánosságban kijelenthető, hogy az egyre komplexebb viselkedést leíró modellek, mind matematikai értelemben, mind a modellek anyagparamétereinek fizikai méréssel történő meghatározásában, egyre nagyobb kihívást jelentenek.

A szoftverek, kiszolgálva az alkalmazó mérnököket, folyamatosan fejlesztik az alapanyag adatbázisukat, hogy a viszonylag bonyolult matematikai és mechanikai ismeretek nélkül is, csak alkalmazói szintű felhasználói ismeretek mellett, képesek legyenek jól használható modellezések felépítésére. Jelenleg az autóiparban használt anyagminőségek viselkedését leíró összefüggések és azok anyagparaméterei jó eséllyel megtalálhatók a célorientált alkalmazásokban. Egy lemezalkatrész tekintetében mutatja be az 1. ábra a szerszámnyitás utáni visszarugózásból adódó geometriai eltéréseket. Az 1. ábra bal oldali részlete a szerszámfelületek kompenzálása nélküli deformációkat, míg az ábra jobb oldali részlete a szerszámfelületek geometriai kompenzációja utáni eltéréseket mutatja be az elérni kívánt referencia geometriához képest.



1. ábra. A referencia felülettől mért eltérés a geometriai kompenzáció előtt és után [1].

Az ilyen elemzések kivitelezéséhez a szoftverekben izotróp, lineárisan kinematikusan keményedő anyagmodelleket szükséges használni. Ezen anyagmodellek viszonylag nagyszámú anyagparaméter ismeretét kívánják meg, ami egy-egy új anyag megjelenése során fizikai mérések sokaságának a kivitelezését jelenti, gyakran a viszonylag bonyolult mérőkészülékek alkalmazásával.

2. A visszarugózás numerikus modellezése és anyagparaméterei

A visszarugózás numerikus modellezését a célterületre kifejlesztett végeselemes szoftverek több éve, az autóipari lemezalkatrészek tekintetében megfelelő pontossággal kezelik. Ennek alapja az, hogy a szoftverben alkalmazott matematikai- és mechanikai modelleket több évtizede folyamatosan fejlesztik, amelynek lépései jól követhetők Hosford [2], Dixit [3] és Banabic [4] összefoglaló munkáiban.

Az egyik piacvezetőnek tekinthető szoftver, az AutoForm, izotróp-kinematikusan keményedő modelljét az előzetes kutatások eredményeinek felhasználásával Kubli és szerzőtársai dolgozták ki [5]. A modell anyagparaméterei viszonylag egyszerűen meghatározhatók ún. alakváltozási hiszterézis görbék alapján, amit 2. ábra a) részlete szemléltet.

Az alakváltozási hiszterézis egy húzó-nyomó egytengelyű feszültségállapotban végzett valódi alakváltozás-valódi feszültség diagram, amelynek a kezdeti szakaszát linearizálva a feszültség-alakváltozás közötti kapcsolat az így meghatározott egyenes meredekségével leírható. Ez a Hooke-törvényben szereplő rugalmassági vagy Young modulus. A folyáshatár utáni nemlineárisan emelkedő szakasz az AutoForm alkalmazásban a kombinált Swift-Hockett-Sherby formulával (1) közelíthető, amelynek a paraméterei az egytengelyű húzás tartományában a diagramból meghatározhatók.

$$\sigma = (1 - \alpha)\{C(\varepsilon_{pl} + \varepsilon_0)^m\} + \alpha\{\sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i)e^{a\varepsilon_{pl}}\} \quad (1)$$

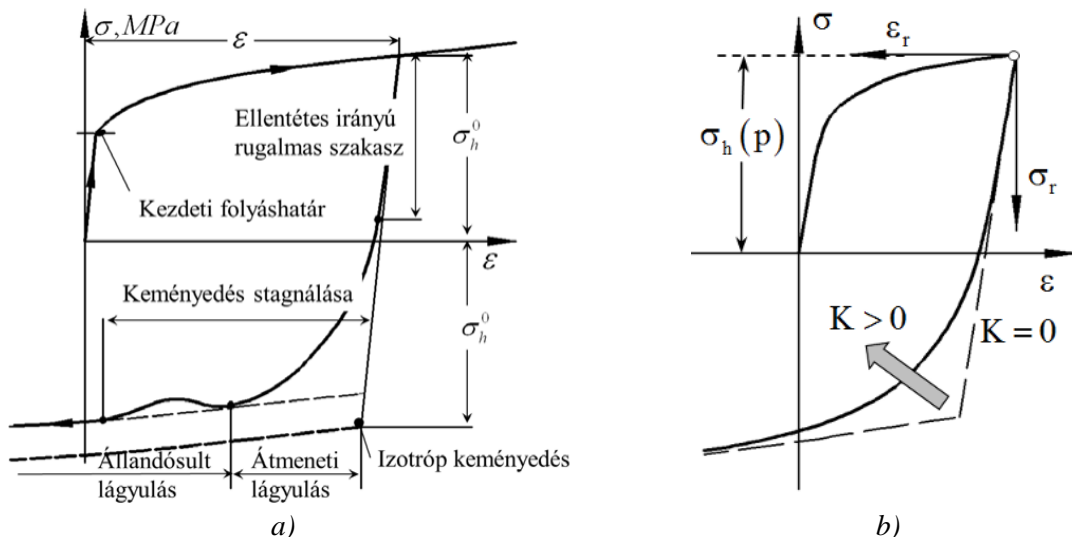
Az alakváltozási hiszterézis további (tehermentesítő és nyomó igénybevételi) szakaszára Kubli és társai [5] a 2. ábra b) részletén bemutatott $\varepsilon_r - \sigma_r$ fordított koordináta tengelyeket definiálva a (2) összefüggéssel megadható közelítést alkalmazták.

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_l(p)} + K \arctan h^2 \left(\frac{\sigma_r}{2\sigma_{h(p)}} \right)^2 \quad (2)$$

A K anyagparaméter hatását jól szemlélteti a 2. ábra b) részlete, amely az átmeneti lágyulás sebességével arányos. Az összefüggésben szereplő E_l az ellentétes irányú rugalmas szakaszban a rugalmassági modulus csökkenését írja le. A csökkenés mértéke az előzetesen bevitt képlékeny alakváltozással (p) arányos. Matematikai összefüggéssel (3) megfogalmazva ez a következő.

$$E_l = E_0[1 - \gamma(1 - e^{-\chi p})] \quad (3)$$

Ebben az összefüggésben szereplő γ és χ további anyagparaméterek a mérési pontok ismeretében interpolációval meghatározhatók.



2. ábra. Alakváltozási hiszterézis és az abból meghatározható anyagparaméterek.

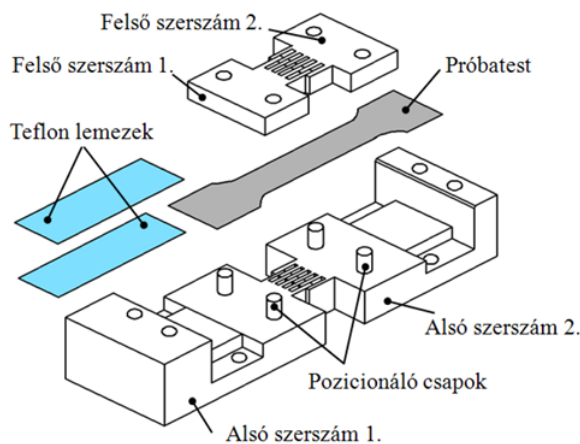
Az anyagparaméterek meghatározását lehetővé tévő egytengelyű húzó-nyomó vizsgálatok kivitelezése a lemezpróbatestek nyomó igénybevétel hatására bekövetkező kihajlása miatt megköveteli valamilyen kihajlást megakadályozó mérőkészülék alkalmazását.

3. Ciklikus húzó-nyomó mérőkészülékek áttekintése

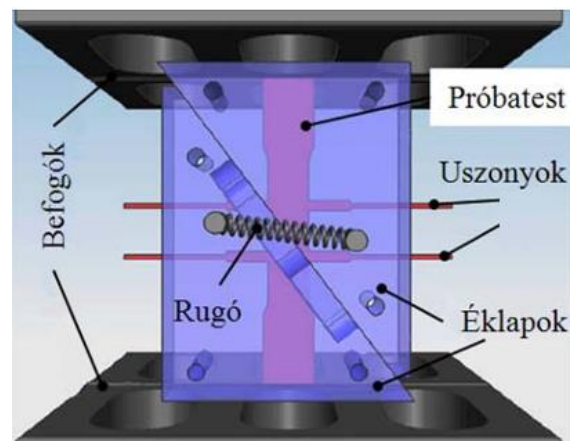
Az alakváltozási hiszterézis görbék felvételével számos kutató foglalkozott az utóbbi évtizedekben. A mérőkészülékek fejlesztése az alakítási folyamatok numerikus modellezését lehetővé tévő szoftverek fejlődésével egyre nagyobb jelentőségűvé vált, mivel a visszarugózás anyagparamétereinek meghatározását csak ilyen fizikai mérések kivitelezése teszi lehetővé.

A kialakított mérőkészülék konstrukciónak kezdetben fontos tervezési követelménye volt, hogy az alakváltozás mértékének meghatározását végző extenzométer továbbra is rögzíthető legyen a lemezpróbatesten. Ezt úgy lehetett megoldani, hogy a mérőkészülék kihajlást megakadályozó részét úgy alakították ki, hogy a megtámasztás kárára egy kis területen lehetőséget biztosítson az extenzométer rögzítésére, vagy ha erre nem volt lehetőség, akkor a próbatest geometriáját kellett módosítani úgy, hogy a megtámasztó résztől függetlenül is lehessen mérni, annak hosszváltozását.

Az extenzométer rögzítése mellett további fontos követelmény volt, hogy a készülék a megtámasztást a próbatest megnyúlása után is tudja biztosítani. Mivel a húzási szakasz során „kihúzzuk” a próbatestet a megtámasztásból a szabadon maradt (megtámasztás nélküli) része a nyomó igénybevételi tartományban ki fog hajolni. Továbbá, amikor a próbatest kiinduló hosszánál kisebb méretű lesz (nyomó igénybevételi rész), a készüléknek alkalmasnak kell lennie a megtámasztási hossz rövidítésére is. Ezért a támasztórészeket úgy kellett kialakítani, hogy azok együtt változtassák a megtámasztási hosszukat a próbatesttel.



a) Fésűs megtámasztás [6]



b) Megtámasztás elmozduló ékpárral [7]

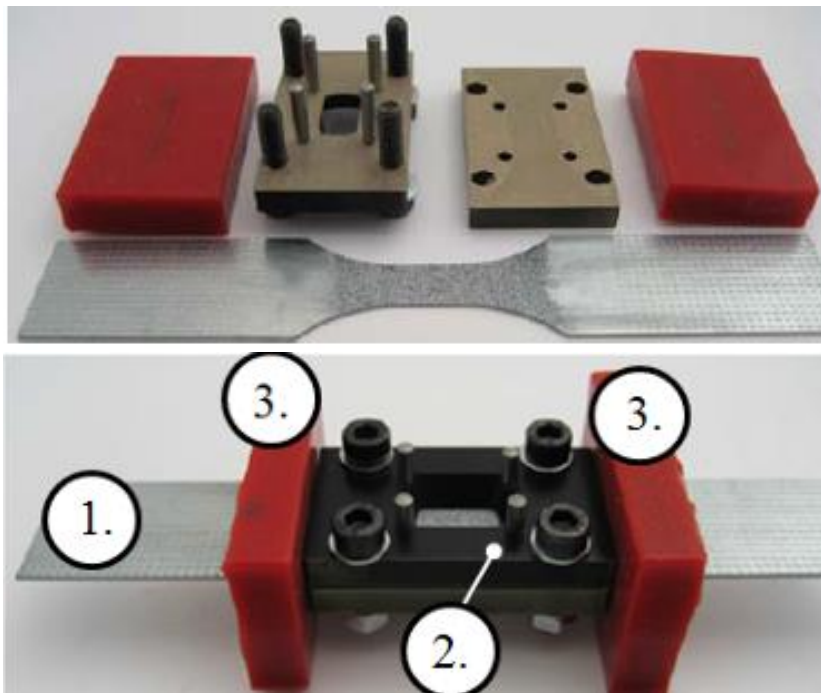
3. ábra. A hosszváltozás mérését extenzométerrel lehetővé tévő mérőkészülék kialakítások.

A 3. ábra a) részletén a megtámasztást két-két (alsó és felső) fésűs kialakítású egymásba elmozdulni képes szerszámelem biztosítja, így követve a próbatest méretváltozását [6]. A fésűs részek szélessége lehetővé teszi, hogy a próbatest élére továbbra is felrögzíthető legyen az extenzométert.

A 3. ábra b) részletén a megtámasztást egymáson ékszerűen elcsúszó szerszámlapok biztosítják [7], amely azonban megakadályozza, hogy az extenzométert közvetlenül a próbatest mérőhosszára helyezzük. Ennek megoldására a próbatesten ún. uszonyokat alakítottak ki, amelyek így a megtámasztásból „kiviszik” a hosszváltozást, lehetővé téve a megtámasztó lapokon kívüli extenzométer felhelyezését.

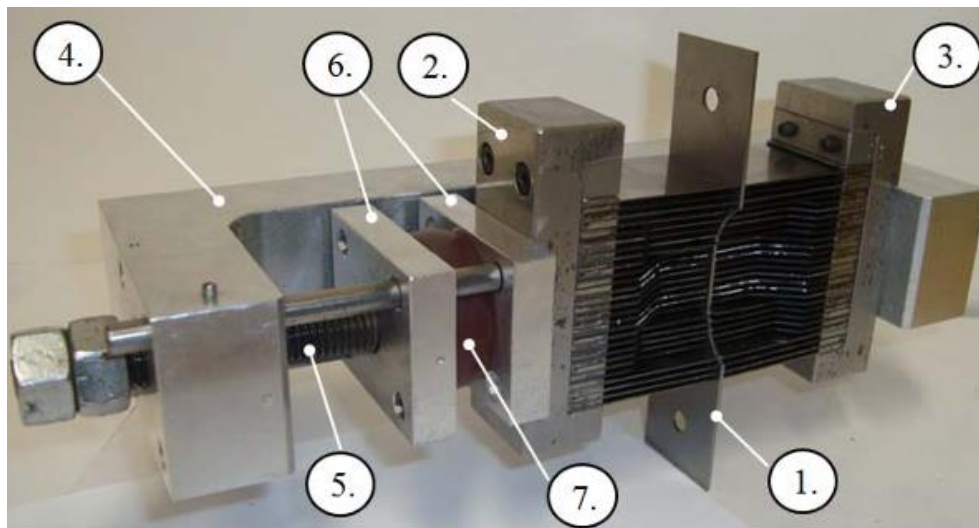
Mindkét módszernek megvannak a maga hátrányai. A fésűs megtámasztás nem biztosított a mérőhossz teljes szélességében így a próbatest szélein mikro-kihajlások jöhetnek létre, ami megzavarja a tényleges hosszváltozás mérését. A 3. ábra b) részletén bemutatott készülék mérési pontosságát megnehezíti, hogy az ún. uszonyok meglehetősen vékonyak és ezek a sík szerszámlapok között súrlódva elhajolhatnak, így téve pontatlanná a mérést.

Az utóbbi évtizedekben az alakváltozás mérésére kifejlesztett optikai elven történő mérések lehetővé tették, hogy a megtámasztás során nincs szükség a próbatest kis részének szabadon hagyására, mivel az alakváltozást mérő eszköz nem érintkezik a próbatesttel. Ez új mérőkészülék konstrukciókat tett lehetővé, amelynek egyik megvalósítása az Eggertsen és társa [8] által kifejlesztett, 4. ábrán látható készülék.



4. ábra. A próbatest hosszváltozását optikai elven mérő készülék [8].

A 4. ábra jelöléseit felhasználva a mérőkészülék egy, a megtámasztást biztosító négy csavarral összefogott részből (2) és a hosszváltozásra képtelen megtámasztást kompenzáló gumilapból áll (3). A mérés kezdetén, ha előfeszítik a gumilapokat, akkor azok a hossz növekedését és csökkenést egyaránt képesek követni. Az optikai elven mért hosszváltozás miatt azonban egy nagyméretű ablakot kell kimunkálni az egyik megtámasztó lapból. Itt elvesztjük a megtámasztást, ami a kihajlás nélkül vizsgálható alakváltozási tartományt szűkíti. További hátránya, hogy ha a próbatest szilárdsága növekszik, akkor az ablak méreteit csökkenteni szükséges a kihajlási hajlam növekedése miatt, ami a hosszváltozás mérését megnehezíti.



5. ábra. Támasztó lemezsoros mérőkészülék [9].

Elemelve a szakirodalom alapján a megtámasztó készülékek előnyeit és hátrányait, 2013-ban az Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézetben kifejlesztése került egy, a nagyszilárdságú lemezanyagok húzó-nyomó vizsgálatát lehetővé tevő mérőkészülék, amelyet az 5. ábra szemléltet [9].

Az 5. ábrán a próbatest (1) megtámasztását két egymással szembefordított lemezsort tartó betét (2), (3) próbatestre szorítása végzi. Azért, hogy a szorítás ne legyen merev, ami megakadályozná a próbatest zömítése során a lemezvastagság növekedését, a szorító erőt egy előfeszített poliuretán betét (7) biztosítja. A próbatest folyamatos megtámasztását, mind a húzó, mind a nyomó tartományban, a próbatesttel együtt mozgó támasztó lemezsor egyes lemezeinek elhajlása biztosította. Az alakváltozás mérésére kontakt extenzométert alkalmaztunk. A lemezsor osztásközét úgy terveztük meg, hogy az extenzométer nyomóélei egy-egy osztásközben helyezkedtek el, így megtámasztással kapcsolatban – az előzőekben bemutatott készülékekkel ellentétben – nem kényszerültünk kompromisszumra. A mérőkészülék segítségével nagyszilárdságú acél (DP) anyagcsoporton több anyagparamétert is meghatároztunk, amivel a visszarugózás modellezése pontosabbá vált a matematikai modellezések során.

4. Alumínium-ötvözet anyagparamétereinek meghatározása új fejlesztésű mérőkészülékkel

A nagyszilárdságú alumínium-ötvözetek térnyerése az autóiipari lemezanyagok között megkövetelte, hogy az új anyagok viselkedését leíró egyenletek anyagparamétereit is az egytengelyű húzó-nyomó vizsgálatokkal, fizikai mérésekre alapozva határozzuk meg. Erre a nagyszilárdságú acéllemezek vizsgálatára tervezett készülék nem volt megfelelő. A készülék fő hátránya az volt, hogy a megtámasztást szolgáló lemezsor alapanyagának (50CrV4) szilárdságából adódóan, a DP acélok szilárdságához képest kisebb szilárdságú alumínium-ötvözetben, már a kezdeti előfeszítés hatására is helyi zömítéseket hozott létre a támasztólemezsorok közötti részen, ami a nyomóigénybevételi tartományon még hangsúlyosabban jelentkezett, így a mérés már nem volt egytengelyű feszültség-állapottal közelíthető, ezzel a modellt leíró összefüggések érvényüket veszítették.

Új mérőkészülék fejlesztésére volt tehát szükség, amelynek tervezési követelményrendszere, figyelembe véve a már bemutatott mérőkészülékek előnyeit és hátrányait, a következő:

- a megtámasztás a próbatest teljes mérőhossz felületén történjen meg,
- alkalmas legyen optikai elven működő hosszváltozás mérésére,
- a megtámasztási hossz folyamatosan kövesse a próbatest hosszának növekedést és csökkenését,
- a megtámasztás ne befolyásolja nem elfogadható mértékben a mérés során megkövetelt egytengelyű feszültségállapotot.

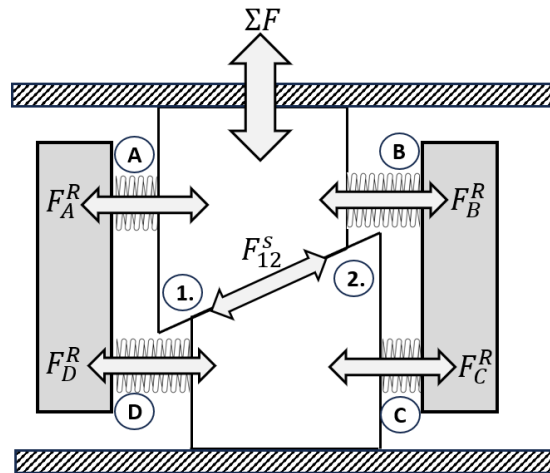
Az ennek a követelményrendszernek megfelelő, új fejlesztésű mérőkészülék képét a 6. ábra mutatja. A megtámasztás folyamatos változásának követését két pár egymáson ékpályán elcsúszó polikarbonát lap biztosítja. A lapok rögzítését a próbatest felszínén egy alumínium-ötvözetből készült mérőkészülék-ház teszi lehetővé. A házon belül a polikarbonát lapok mozgathatóságát és pozíciójuk megtartását rugókkal biztosítottuk.

A készülékház egyszerűen szerelhető a két belső kulcsnyílású csavar segítségével. A polikarbonát lapok egymáson elcsúszó részein teflon szalagot használunk a súrlódás csökkentésére. A polikarbonát lapok lehetővé teszik optikai elven működő hosszváltozás mérését, mivel átlátszóak. Ennek megfelelően a próbatestre egy hálót készítettünk lézergravírozással, mivel más módszerrel felvitt háló a támasztólapokon súrlódva nem maradt a próbatest felszínén.



6. ábra. Új fejlesztésű mérőkészülék.

A polikarbonát lapok helyzetváltoztatását és megfelelő pozícióban tartását a mérőkészülékházon belül rugók biztosítják. A polikarbonát lapok egymáson ékpályán történő elmozdulása és a rugórendszer mindenkor eredő erőrendszere feltételezi, hogy a mérőkészülék valamilyen mértékben befolyásolja a mérési eredményeket. Ennek megértése céljából a 7. ábrán bemutatott mechanikai modellel helyettesítjük a fizikai készüléket.

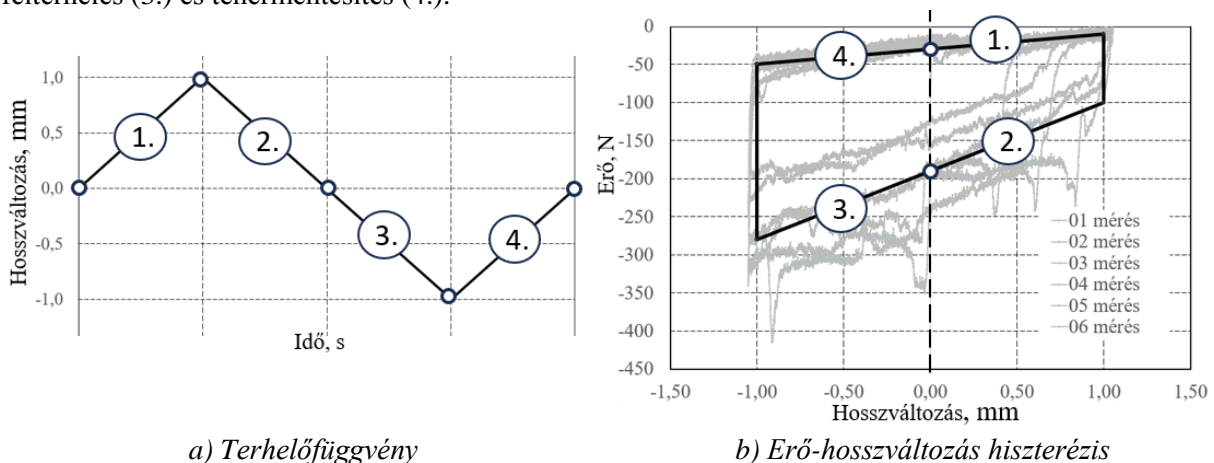


7. ábra. A mérőkészülék mechanikai modellje.

Eltételezve a minimális súrlódási hatásoktól a készülék mérési eredményekre gyakorolt befolyása öt fő erő együttes eredőjéből áll. Ezek az (1) és a (2) polikarbonát lapok ékpályán történő elcsúszásából eredeztethető F_{12}^S súrlódó erő, továbbá az A, a B, a C és a D rugók összenyomása és szétnyílása során fellépő F_A^R , F_B^R , F_C^R és F_D^R mindenkor fellépő rugóerők.

Ahhoz, hogy a mérőkészülék hatását számszerűsítsük, a mérőkészüléket kiszereztük a mérés során használt szerszámházból, és a 7. ábrának megfelelően, két síklap között felvettük a készülék erő-hosszváltozás histerézisét. A mérés során a polikarbonát lapok közé egy rövidített próbatestet helyeztünk, hogy a próbatest és a polikarbonát lapok felszíni súrlódásából származott súrlódóerőt is figyelembe tudjuk venni.

A síklapok elmozdulása a tényleges mérés során használt legnagyobb elmozdulás tartománnyal ± 1 mm vettük fel. Ennek lefutását mutatja a 8. ábra a) részlete, ahol a terhelési ciklus négy fő szakasza jól elkülöníthető: húzó igénybevételű felterhelés (1.), tehermentesítés (2.), nyomó igénybevételű felterhelés (3.) és tehermentesítés (4.).



8. ábra. A mérőkészülék hatásának elemzése.

A terhelőfüggvény eredményeként mért erő-hosszváltozás hiszteréziseket hat párhuzamos mérés esetén mutatja be a 8. ábra b) részlete. Ebből a következő megállapítások tehetők. Amikor az ékpályák mozgása során a polikarbonát lapok a megtámasztási távolságukat növelik és a rugóerők emiatt csökkennek, hiszen a rugók nyílnak (1. és 4. szakaszok), a készülék mérésre gyakorolt hatása a -50 N és -25 N közötti tartományban változik. Ezeken a szakaszokon a hat párhuzamos mérés görbéje szinte teljesen együtt fut. Ezen tartományok jól leírhatók egy lineáris függvénnyel (4), ahol Δh a hosszváltozás.

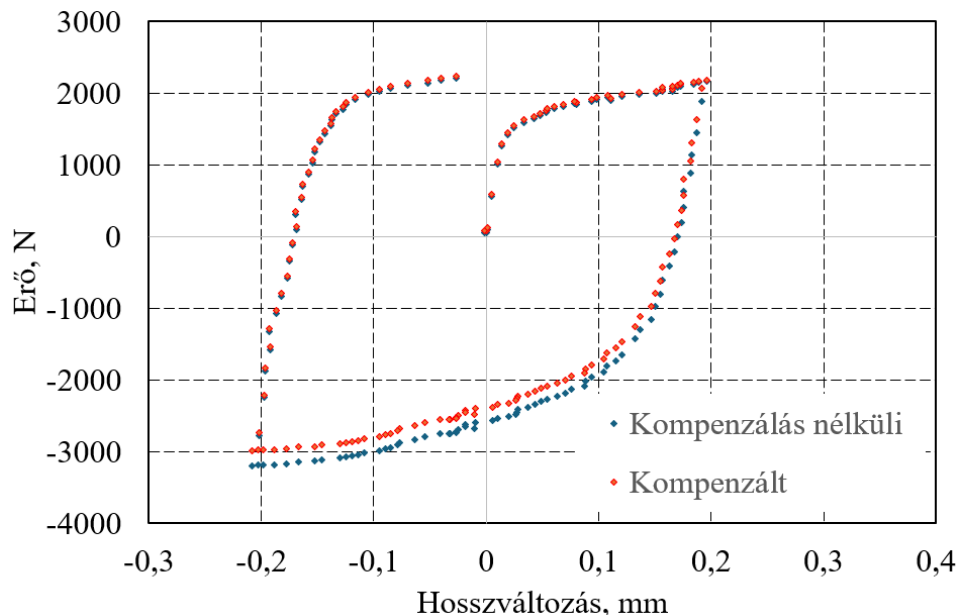
$$\Sigma F_{14} = 20\Delta h - 30 \quad (4)$$

A hosszváltozás csökkenése irányában megfigyelhető (8. ábra b) részletén 2. és 3. szakaszok), hogy a mérések eredményei már egy nagyobb tartományban szórnak, bár átlagos szórásuk kb. 150 N-ra tehető, amely a tényleges anyagparaméterek meghatározása során mérhető értékekhez képest (2000-3000 N) még így is a 10%-os hibahatáron belül esik. Ezért erre a tartományra a hat mérés átlagából a 8. ábra b) részletén folytonos vonallal (2. és 3. szakasz) egy egyenest fektettünk és ezen szakaszokon az (5) összefüggésnek megfelelő kompenzációs függvényt használtuk.

$$\Sigma F_{23} = 90\Delta h - 150 \quad (5)$$

Ezzel a mérőkészülék mérést befolyásoló hatását figyelembe tudjuk venni a különböző alakváltozási tartományokon felvett erő-hosszváltozás görbék esetén. Egy ilyen kompenzáció eredményét mutatja a 9. ábra. Ahol a kék színnel jelölt pontsor a kompenzátlan mérési értékeket a piros színnel jelölt pontsor pedig a kompenzált adatsort mutatja be.

A 9. ábrán jól kivehető, hogy az 1-4 tartományokban a készülék hatása minimálisnak tekinthető a 2-3 tartományoknál a készülék befolyásoló hatása jobban megjelenik, de ennek ellenére hatása a 10%-nál alacsonyabb értékkel bír a befolyásolás tekintetében.



9. ábra. A mérőkészülék hatása a ciklikus erő-hosszváltozás görbék alakjára.

5. Összefoglalás

Összegzésként kijelenthető, hogy egytengelyű ciklikus húzó-nyomó vizsgálatok kivitelezése során, a nyomó igénybevételi tartományban a finomlemezek kihajlását valamilyen mérőkészülékkel meg kell akadályozni. Erre több konstrukciós megoldás is született, amelyek mindegyikére igaz az, hogy adott anyagminőségek vizsgálatára, adott alakváltozási tartományban kisebb, nagyobb megszorításokkal, sikeresen alkalmazhatók. A cikkben bemutatott, új fejlesztésű készülék a nagyszilárdságú alumínium-ötvözetek (6xxx és 7xxx) esetében, optikai extenzométerrel kombinálva, minimális kompenzálás után alkalmasnak bizonyult a feladat elvégzésére. Ez lehetőséget biztosít a végeselemes szoftverekben alkalmazott mechanikai modellek anyagparamétereinek vizsgálatára.

Irodalom

- [1] Zs. Lukács, „Visszarugózásra kompenzált lemezalakító szerszámok tervezési gyakorlata Auto-Form programrendszer alkalmazásával”, *Kutatási eredmények az ATI Intézetben – Évkönyv 2023*, pp. 29–36, 2023.
- [2] W.F. Hosford, *Fundamentals of Engineering Plasticity*, Cambridge, UK: University Press, 2013.
- [3] P.M. Dixit and U.S. Dixit, *Plasticity Fundamentals and Applications*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2015.
- [4] D. Banabic, H.J. Bunge, K. Pöhlandt, and A. E. Tekkaya, *Formability of Metallic Materials*. Berlin, Germany: Springer, 2000.
- [5] W. Kubli, A. Krasovskyy, and M. Sester, “Advanced modelling of reverse loading effects for sheet metal forming processes,” *Proc. 7th Int. Conf. and Workshop on Num. Sim. of 3D Sheet Metal Forming Proc. (NUMISHEET 2008)*, P. Hora, Ed. September 2008, pp. 479–484.
- [6] T. Kuwabara, Y. Kumano, J. Ziegelheim, and I. Kurosaki, “Tension-compression asymmetry of phosphor bronze for electronic parts and its effect on bending behaviour,” *Int. J. of Plasticity*, vol. 25, no. 9, pp. 1759–1776, 2009, doi: 10.1016/j.ijplas.2009.01.004.
- [7] J. Cao, W. Lee, H. S. Cheng, M. Seniw, H. P. Wang, and K. Chung, “Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metal,” *Int. J. of Plasticity*, vol: 25, no. 5, pp. 942–972, 2009, doi: 10.1016/j.ijplas.2008.04.007.
- [8] P. A. Eggertsen and K. Mattiasson, “On the identification of kinematic hardening material parameters for accurate springback predictions,” *Int. J. of Material Forming*, vol. 4, no. 2, pp. 103–120, doi: 10.1007/s12289-010-1014-7.
- [9] Zs. Lukács, “Nagyszilárdságú acélok visszarugózásának modellezése és kísérleti vizsgálata,” PhD értekezés, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország, 2014. doi: 10.1475/ME.2014.008.

KOVÁCSOLT DARAB VIZSGÁLATA VÉGESELEMES SZOFTVER SEGÍTSÉGÉVEL

Kovács Péter Zoltán

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: peter.kovacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk egy süllyesztékes kovácsolással előállított kovácsolt termék virtuális gyártásával foglalkozik. Az elvégzett munka során a DEFORM végeselemes program által nyújtott lehetőségek felhasználásával vizsgálatra kerültek az egyes alakítási lépések. A valós termék alakítási folyamata zömítésből, előkovácsolásból és készre kovácsolásból állt. Az összehasonlítások alapját a szálfutások képezték. Az eredmények alapján a modellezett szálfutások minden esetben jól jellemezték a valódi körülmények között képződő anyagáramlást. Az elkészült modelleken vizsgálatra került a különböző kenési állapotok hatása is. Az alacsony, illetve magas súrlódási esetekkel összehasonlítva meg lehetett állapítani, hogy az apróbb különbségek alapján a szálak sűrűsödésében vannak eltérések, amik alapján a gyártás során lejátszódó alakítás közelebb áll az ideális jó kenési paraméterekkel végzett kovácsoláshoz.

Kulcsszavak: süllyesztékes kovácsolás, szálfutás, súrlódás, DEFORM

Abstract

The main topic of the article is the virtual production of a forged product produced by drop forging. During the work carried out, the individual forming steps were examined using the possibilities provided by the DEFORM finite element program. The forming process of the real product consisted of densification, pre-forging and finished forging. The basis of the comparisons was the thread runs. Based on the comparisons, in all cases the modeled thread runs well characterized the material flow, formed under real conditions. The effect of different lubrication conditions was also examined on the completed models. Comparing the low and high friction cases, it was possible to establish that there are differences in the densification of the threads based on the minor differences, which means that the forming taking place during production is closer to the ideal forging with good lubrication parameters.

Keywords: drop forging, thread running, friction, DEFORM

1 Bevezetés

A süllyesztékes kovácsolás a mindenki által jól ismert hagyományos szabadalakító kovácsolás egyik gépesített változata. A szabadalakító kovácsolás esetén az üllő és a kalapács a fő eszközök. Amíg az üllő az alátámasztást biztosítja, addig a kalapács segítségével biztosítják a fémtest alakításához szükséges energiát. Az esetek jelentős részében mindkét elem egy síklapú alkatrész. Ezzel ellentétben a süllyesztékes kovácsolásnál az alsó és a felső szerszám végzi az alakítást, melyek egymásba vezetése

során az alakított fém a végtermékhez hasonló alakot vesz fel pár lépésben. Ennek köszönhetően a geometriát tekintve nagy bonyolultságú darabok előállítása is lehetséges. Ugyanakkor a szerszámok alakjának a kialakítandó forma negatívját tartalmazniuk kell önmagukban, ebből fakadóan komolyabb tervezési, felügyeleti háttér szükséges a szabadalakító kovácsoláshoz képest. A megfelelő kovácsolt alak kialakításához nagy energia szükséges, amelyek biztosítására kalapácsokat vagy préseket alkalmaznak. Kovácsolni a legtöbb esetben vasötvözeteket szoktak, a hideg kovácsolástól eltekintve ezek mind magas hőmérsékleten történő folyamatok, általában 900-1300 °C közötti hőmérsékleten. Ebből adódóan látható, hogy a technológia nem veszélytelen, ezért megfelelő felkészültséget és mérnöki tudást igényel [1]. A süllyesztékes kovácsolással – szabadalakító kovácsolással ellentétben - bonyolult geometriájú darabok kialakítása is megvalósítható egy technológiai lépésben. Az elkészült darabra vonatkozóan, pedig szigorúbbak a tűrések, mint más kovácsolási technológiák esetén.

Az előállított termékek általában 1 kilogramm körüli súllyal rendelkeznek, de lehetséges több tonnás darabok kovácsolása is. A legfőbb mérethatárt az alapanyag és a termék mozgatása szabja meg.

A technológia megvalósíthatósága két fő tényezőtől múlik, az első az alapanyag megfolytatásához szükséges feszültség, a másik az anyag kovácsolhatósága.

A süllyesztékes kovácsolási technológiáknál az alakító szerszám hőmérséklete alacsonyabb az alapanyagénál. A fém üregtöltése és folyása leginkább az alapanyag kovácsolhatóságától és az alakítási szilárdságától függ. Ezeket befolyásolja a képzendő alak bonyolultsága, a szerszám és a fém között fellépő súrlódás és a szerszámtömb hűtőhatása [1]–[3].

2 A végelelemes szimulációs programok alkalmazásának okai a kovácsolás területén

Napjainkban a számítástechnikai vívmányok és a matematikai modellek fejlődésének eredményeként az ipar szinte minden területén megjelennek a véges elemes modellezésre (VEM) képes szoftverek. Ezek az eszközök széleskörű segítséget nyújtanak mind a tervezés szakaszában, mind a gyártás közben jelentkező problémák megoldásában.

A módszer eredete visszanyúlik a múlt század 40-es, 50-es éveire, mivel már ekkor felmerült az igény olyan megoldási technikák kidolgozására, amik lehetővé tették komplex rugalmassági és szerkezeti analízis problémák megoldását. Ebben úttörő szerepet játszott A. Hrennikoff és R. Courant. A szimulációk megvalósításához szükség volt megfelelő számítástechnikai háttérre, ezért is datálható erre az időszakra a végelelemes szimulációk alkalmazásának, fejlesztésének kezdete. Az elterjedést, fejlődést segítette a 60-as és 70-es évek elektronikai fejlődése is, így napjainkra meghatározó módszerré válhatott [4].

Komplex problémáknál az alkalmazást az indokolja, hogy azok megoldásához parciális differenciálegyenleteket kell megoldani a rendszerre vonatkozóan. Ezek megoldása papíron rendkívül sok időt igényelne, vagy nem is lehetséges. Emellett a gyártási költségek csökkentésében is nagy segítséget nyújt az alkalmazásuk. Egy működő modell megtervezése után, a tervezett szerszámokkal való szimuláció lehetővé teszi az első való gyártás alkalmával is a sorozatgyártáshoz megfelelő minőség előállítását, amivel a többszöri kísérleti szerszámozás és tesztelés elkerülhetővé válhat. Esetleges gyártási problémák, reklamációk esetében a szoftverek gyors ellenőrzésre is alkalmasak például egyes hibaokok kiszűrésére és a vizsgálandó területek azonosítására a vevői specifikációtól való eltéréseknél. A megoldáshoz a szimulációs programok a vizsgálni kívánt rendszert véges elemekre bontják, azaz kisebb területeken, térfogatokon végzik el a szükséges számítását a megadott peremfeltételeknek megfelelően. Majd ezeket egyesítve adnak eredményt a vizsgálat tárgyának

egészére. Az elemek számítása során felmerülő hibákat a variációs számítás segítségével csökkenti a program a modell összeállítása előtt [4].

3 A vizsgált kovácsdarab

A vizsgált darab egy hajtáslánci elem. Az elkészült alkatrész a személygépjármű váltójából való kihajtásért felel. Geometriailag két részre bontható a funkció szempontjából, egy tengelycsonki részre és egy kúpos kapcsolódó felületre. A csonk rész a váltó irányában kapcsolódik, a kúpos szakasz pedig a féltengellyel való nyomaték átvitelért felelős.

A vizsgált alkatrész hengerelt kör keresztmetszetű rúdacélból kerül kialakításra. Az alapanyag darabolása gyorsdaraboló segítségével történik, a jó vágási felület érdekében. A darabolás nullvágással kezdődik, majd a megfelelő alapanyag egy szállítószalag segítségével kerül az ideiglenes tárolásra szolgáló konténerbe. Ezt követően felöntésre kerül egy rázó berendezésbe az anyagmozgató által, ami biztosítja az egyenletes adagolást a gyártáshoz. A kiadagolt darabok egy sín pályára kerülnek, ahol egy toló mechanika biztosítja a továbbítást a hevítésért felelős szakaszon keresztül.

A melegítés indukciós kemencében történik a kovácsolási hőmérsékletre. Ennél a darabnál 1280 °C a beállított középérték. A felmelegített darab egy csúszdán jut a zömítést végző présgép elé, amibe a beadagolást egy robot végzi. Amennyiben az alapanyag hőmérséklete túrésen kívül esik - aminek a mérése a kemence végénél pirométerrel történik – az eltávolításra kerül. Alacsony hőmérséklet esetén egy láncos szalag továbbítja a darabot az erre odahelyezett konténerbe, ahonnan a lehűlést követően újra felhasználásra kerül. Túlhevítés esetén a robotkar végzi el az elkülönítést, az erre a célra kialakított tárolóedénybe, ahonnan selejtezésre kerülnek a darabok.

Az előzömítést végző prés egy kisebb excentersajtó. Itt egyszerű sík nyomólapok között történik a robotkar által lapjára állított buga előzömítése, onnan egy pneumatikus kar továbbítja az alapanyagot, majd az egy szalagon kerül a fő alakító gépbe.

Az előkovácsolást és a készrekovácsolást egy excentersajtó gép végzi. Itt az adagolás manuálisan történik emberi erővel. Az adogatás a szerszám kazetta baloldaláról a jobboldal irányába történik. A két lépcsős alakítást követően a tűzi fogóval a kovács a darabot a továbbító szalagra helyezi, miközben egy a mozgás irányában elhelyezett kapcsoló segítségével megindul a szerszám kenéséért és hűtéséért felelős grafitozó berendezés ciklusa.

A megfelelő kenést a grafit szuszpenzió biztosítja, amit a gyári előírásoknak megfelelő arányban vízzel hígítva alkalmaznak. A kenési szakasz előtt levegő előfűtás biztosítja a szerszámok revementességét a következő darab kovácsolása során. Az előírt mennyiségű elegy célba juttatásáért 4 porlasztó fej felelős, 2-2 alakítási lépésenként. Az esetlegesen el nem párolgó folyadékot az utófűtás távolítja el.

A készre alakított termék ezt követően melegsorjázásra kerül, ezért ismételtelen az excentersajtóba kerül. Az ültetőbe kézi erővel rakják be, ahol a stanc vágógyűrű elvégzi a még szükséges sorjátlanítást. Lehűlést követően nemesítésre kerül egy külső üzemben, ahonnan a későbbiekben a készre munkálást végző vevőhöz kerül.

4 A feladat megoldása során használt DEFORM program

A DEFORM szoftvercsalád kiemelkedően alkalmas a kovácsolási problémák és az optimalizáció vizsgálatára. A kezelő felülete jól kezelhető, nem szükséges hosszas betanulás az egyszerűbb feladatok megoldásához. A kovácsolás mellett a szoftver alkalmas hideg és meleg alakítások vizsgálatára, valamint hőkezelési problémák megoldására is. Alapvetően a nagy alakváltozások vizsgálatára vannak

optimalizálva az összefüggések, de ettől függetlenül lehetővé teszik sajtolás, hengerlés és forgács leválasztással járó megmunkálások vizsgálatát is, mint például esztergálás, marás, fúrás, vésés. A széles alkalmazási lehetőségeknek köszönhetően ipari környezetben előszeretettel használják.

A feladat megoldása során a DEFORM 2D programrész került alkalmazásra, emellett rendelkezésre áll a 2D-3D és külön a 3D opció is. A termék alakja miatt ideális a 2D-s verzió. Itt lehetőség van az alakítási lépések egyenkénti vagy egyszerre történő lefuttatására is.

Az első lépés a specifikációk szerint méretre vágott hevített alapanyag előzőmítésének lemodellezése volt. Az alakítás végpontja akképpen lett megválasztva, hogy a keletkező hordós test jól illeszkedjen az előkovács szerszám geometriája által definiált anyagot pozicionáló ülék részbe, a valós kovácsolással megegyezően. Az így létrehozott pontháló került átültetésre az előkovácsolás lépéséhez tartozó süllyeszték modellbe. A kovácsolás végpontja az alakítási lépéseket ábrázoló rajz alapján lett megválasztva, az ott leolvasható stancvastagság figyelembevételével. A készrekovácsolás modellezése során a fentebb leírtakkal megegyező módon lett a modell kialakítva.

Az első lépés a Pre Processor menüben megadni a szükséges, illetve ismert paramétereket az alakítási feladattal kapcsolatban. Ide tartozik az alapanyag megadása és az alakítási körülmények leírása. Külső forrásból, vagy manuálisan lehet megadni a szerszámgeometriákat. A programon belül rendelkezésre áll egy anyag könyvtár, amiben a leggyakoribb fémötvözetek megtalálhatók a megfelelő alakítási, hőkezelési jellemzőiket tartalmazó anyagmodellekkel együtt.

A rajzi adatok alapján az alapanyag a ZF 64 módosított szabványnak felel meg, ez a 41CrS4 acélötvözet módosított összetételű változata, ennek összetétele az 1. táblázatban látható. A különbség a kén és alumínium tartalomra vonatkozó szűkebb tűrésben nyilvánul meg. A DEFORM 2D programban a kovácsdarab alakításának modellezésére az elérhető anyagmodellek közül az összetétel alapján a legjobban az AISI szabványcsalád 5140-es számjelzéssel azonosított acélya felelt meg.

1. táblázat. A vonatkozó ZF szabványnak [5] megfelelő alapanyag összetétel [tömeg%]

Érték	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
Alsó határ	0,44	0,10	0,60	–	0,020	0,90	–
Felső határ	0,49	0,40	0,90	0,025	0,040	1,20	0,40

A deformáció modellezéséhez szükség volt a szerszámgeometriák felvételére a programban, ami ebben az esetben a rajzi méretek alapján a kontúrponatok megadásával történt. Ennek elvégzéséhez a szerszám rajzok alapján azok fél geometriája került megadásra a program koordináta rendszerében.

A metszeti fél geometria megadása elegendő mind az előkovács darabok, mind a készrekovácsolt darab esetében, mivel geometriailag körszimmetrikusak, így az anyagáramlás és alakváltozás tekintetében a szimmetriatengely mentén homogénnek vehetők.

A rajzokon szereplő adatok alapján a kiinduló darab 55 mm átmérőjű és 86 mm hosszúságú, körkeresztmetszetű buga. Az előzőmítés során melegen 68 mm magasságú hordós testet kell elérni – ahol a véglapok átmérője ~60 mm – az előkovácsolás alsó szerszámába való megfelelő illeszkedéshez.

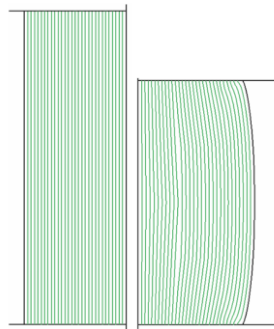
4.1 Előzőmítés modellezése

Az előzőmítés két sík lap között történik. A hálózás során a programban 5000 elem megadásával történt a modellezés. Sok program esetében a modell megalkotása hosszú időt vesz igénybe, mert a hálózást manuálisan, vagy fél manuálisan kell elvégezni, ami sok időt és energiát igényelhet. A

DEFORM esetén ezt a szükséges adatok megadása után a program automatikusan elvégzi. A számítás során adaptívan változtatja az elemek számát és elhelyezkedését az alakváltozás fényében [6].

„Shear” típusú súrlódás került alkalmazásra az érintkező szakaszokon, 0,7-es konstanssal, mivel a zömítés kenés nélkül történik, és ilyen paraméterek mellett ez a javasolt érték. A modell összeállítása után megadásra kerültek a mozgás viszonyok. A „Top Die” végzi az alakítást folyamatos -y irányú haladással 18,5 mm/s sebességgel.

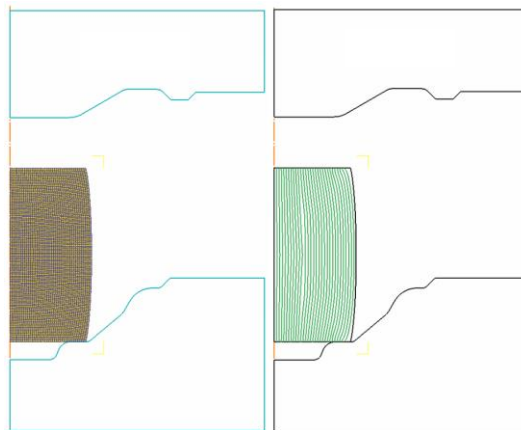
A kész szimulációból a „Graph” opció segítségével nyerhetjük ki az alakításra vonatkozó erő-elmozdulás adatokat, amikből diagram készülhet. A „Flow net” segítségével szálfutást adhatunk meg az alakított darabra (1. ábra). Megfelelő felbontásért 30 függőleges szál került illesztésre az alapanyagra, ami az alakításnak megfelelően egy hordós testet eredményez.



1. ábra. Szálfutások az előzömítés előtt és után az alapanyagban.

4.2 Előkovácsolás modellezése

Az alapanyag a valóságnak megfelelően az alsó szerszámba került beültetésre a megközelítőleg 60 mm átmérőjével; ez látható a 2. ábrán.

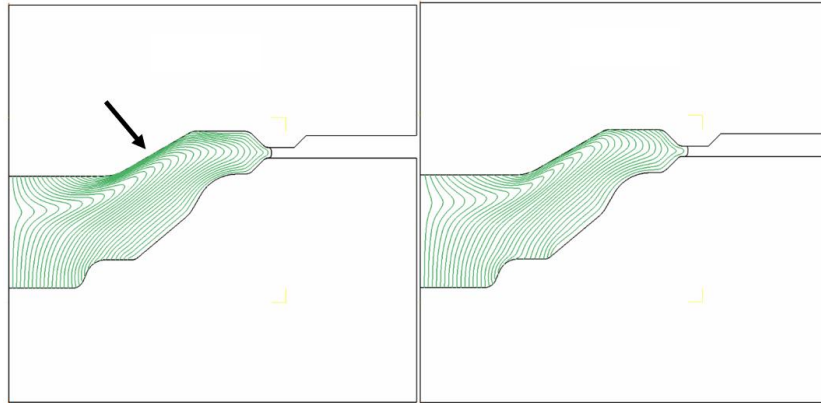


2. ábra. Előkovácsolás, a zömített alapanyaggal hálózva és szálfutással.

Az előkovácsolás során az alakításhoz 1500 mm/s sebesség lett megadva. A végállapot úgy lett megválasztva a lépések számánál, hogy a sorjacsatorna 3 mm-es vastagságig zárjon össze.

Két szimuláció került lefuttatásra különböző paraméterekkel, az első $\mu=0,3$ -as súrlódási együtthatóval, ami a valós körülményeknek megfelel, a második pedig $\mu=0,7$ -es súrlódási együtthatóval.

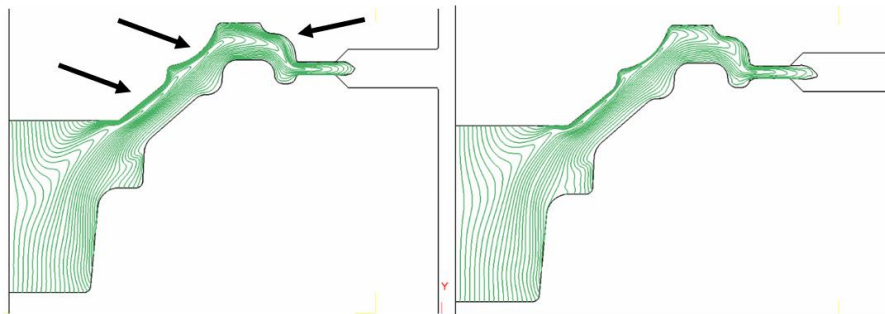
A súrlódás mértékétől függően látható eltérések keletkeztek a szálfutásban a szimuláció során, ez látható a 3. ábrán.



3. ábra. Előkovácsolás végállapota 0,7-es (bal oldal) és 0,3-as (jobb oldal) súrlódási együtthatóval.

4.3 Készrekovácsolás modellezése

Az alakítás körülményei megegyeznek az előkovácsolással, mivel ugyanazon gépen történik ez a lépés, csak másik ülékben. A végállapotnál a célérték itt is a 3 mm-es sorja csatorna méret volt (4. ábra).



4. ábra. Készrekovácsolás szálfutása 0,7-es (bal oldal) és 0,3-as (jobb oldal) súrlódási együtthatóval.

A szálfutás nagyobb súrlódás esetében nagyobb sűrűsödést mutat a darab felső szakaszán; ez az ábrán nyíllal van jelölve. Komoly eltérések nem tapasztalhatók, az előzőekkel megegyezően az alakítási erő szükségletben tapasztalható komoly különbség.

5 Elvágott kovácsdarab minták maratása szálfutás vizsgálatához

Az összehasonlításhoz minta kivételre került sor a zömítésből, előkovácsolásból és készrekovácsolásból. A darabok félbe lettek vágva szálfutás készítéséhez.

A mintákat maratással készítettünk elő, melynek feladata a darab mikro- és makroszerkezeti jellegzetességeinek kiemelése, láthatóvá tétele. Ide tartozik a szemcseméret meghatározása, a különböző fázisok azonosítása és egyéb tulajdonságok, mint esetünkben a szálfutás meghatározása. Az

anyagon belül eltérő feszültségállapottal, összetétellel, kristály szerkezettel rendelkező részek egymástól megkülönböztethetővé tétele többnyire szelektív kémiai maratással érhető el. A minták előkészítése során szelektív kémiai maratás alkalmazására kerül sor, ez az elektród potenciál különbségeken alapul a pH függvényében, így az esetek többségében a maratószerek alapja savas, bázikus valamilyen oxidáló vagy redukáló szer mellett [7].

A minták szálfutásának láthatóvá tételéhez, az acél összetétele alapján, a maratáshoz tömény sósav és víz 1:1 arányú elegye került alkalmazásra folyamatos 80-90 °C-on való hőntartás mellett, 30 perces időtartamon keresztül. A szálfutások maratásának elkészülte után szükség volt a szimuláció során alkalmazott vonalas szemléltetés ábrázolására a kapott darabokon, azok összehasonlíthatósága érdekében. Az 5. ábrán láthatók a kapott maratott felületek a szálfutással.



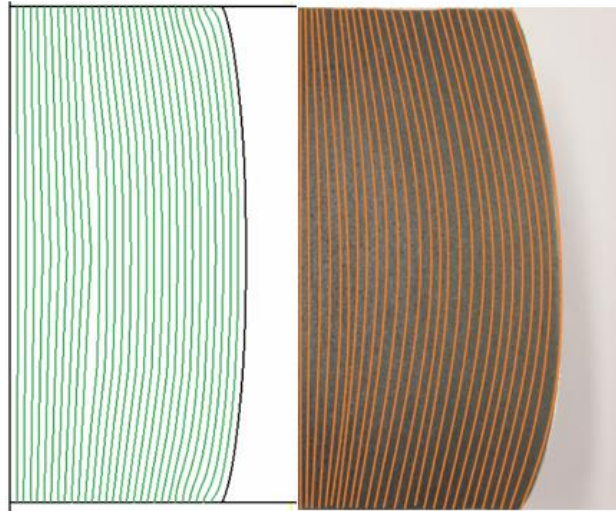
5. ábra. Zömített darab (bal felső), előkovács darab (középső fent) és készrekovácsolt darab (jobb felső) maratott képe és (alattuk) a maratott képekre felvitt szálfutási vonalak.

6 Szimulált és valós szálfutások összehasonlítása

A szimulációk és a mintadarabok elkészülte után elvégezhető a két szálfutás csoport összehasonlítása azzal a céllal, hogy meghatározzuk, hogy az alapadatok alapján készített végeselemes modell mennyire tükrözi a valóságot egy sorozatgyártásban lévő termék esetén. Elsőként a zömített alapanyag került összehasonlításra.

6.1 Zömített darabok összehasonlítása

A 6. ábrán látható a két zömített darab egymás mellé illesztett képe. A valós gyártásból kivett minta esetében kissé erősebb hordósodás jelentkezett, valamint az is a középvonaltól lentebb helyezkedik el. Ezek alapján az állapítható meg, hogy a zömítő lapok és a hevített alapanyag között a súrlódás nagyobbak bizonyult a programban használt 0,7-es értéknél. Az alsó szerszámfél és a darab között nagyobb mértékű volt a felső szerszámhoz képest, erre a hordósodás lefelé tolódásából következtethetünk.



6. ábra. Szimulált és valós szálfutás összehasonlítása zömítés esetében.

A fentebbiekben leírt következtetéseket igazolják a zömített darab véglapjairól készített fényképek. A 7. ábrán látható a darab alsó véglapja, azon egyértelmű egyenetlenségek láthatók, amik alakítás közben, mondhatni abba „belekapaszkodnak”, ami erőteljes hordósodáshoz vezet. Az ilyen jellegű felület a $\mu=1$ súrlódási értéknél is nagyobb hatást fejt ki az alakításra.

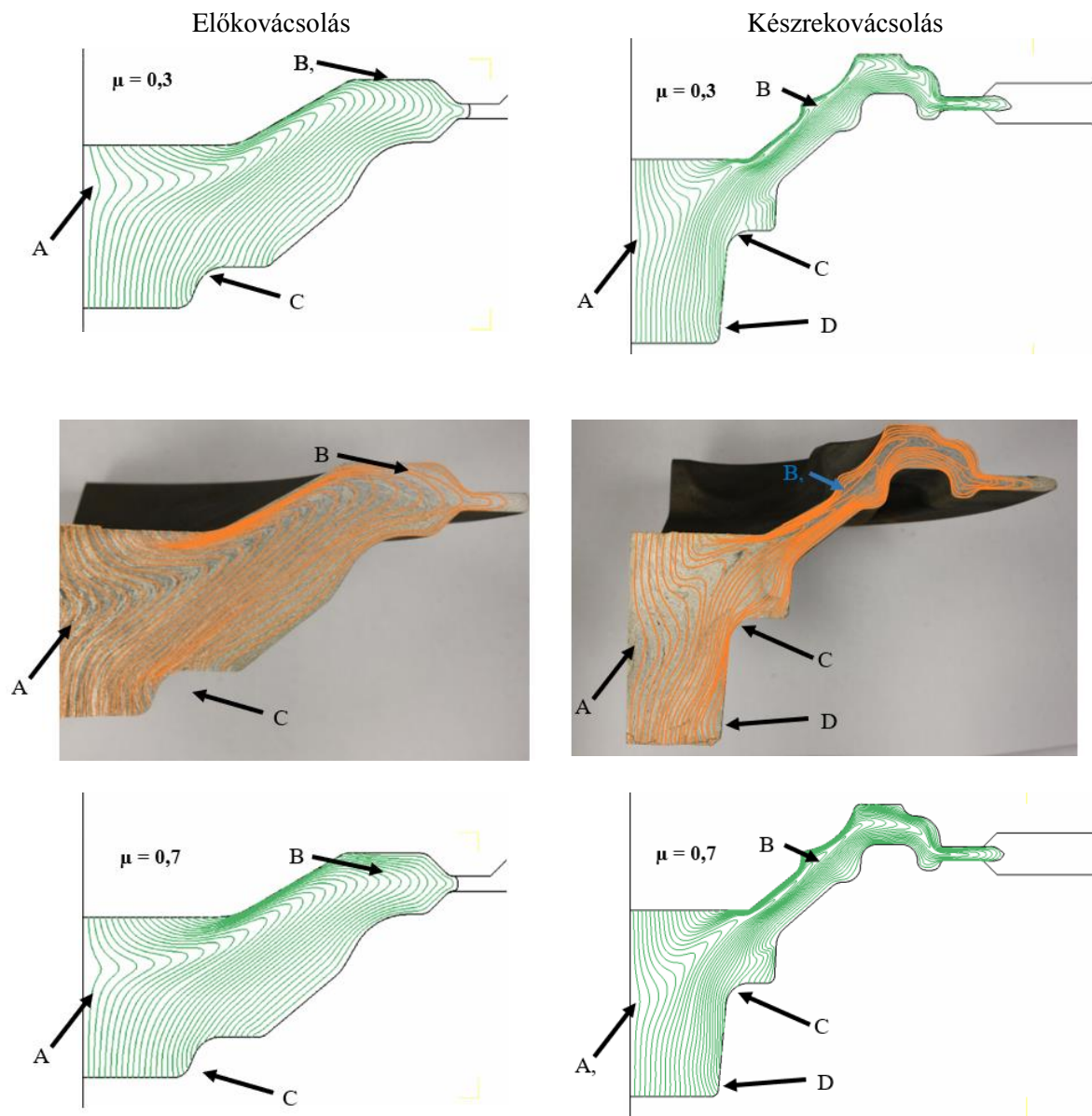


7. ábra. Zömített alapanyag véglapja.

A DEFORM-ban készített szimuláció ideális esetet modellez, így az ilyen jellegű eltéréseket ebben az esetben nem mutathatta ki, ugyanakkor alapvetően jól jellemezte a szálfutást.

6.2 Előkovácsolt darabok összehasonlítása

Az előkovácsolt darabok összehasonlítása a 8. ábrán látható. Itt a $\mu=0,3$ -as súrlódási együtthatóval, és a $\mu=0,7$ -es értékkel készített modell került összehasonlításra a valós állapottal, annak megállapítására, hogy milyen jellegű kenési körülmény jellemzi jobban a valóságot.



8. ábra. Szálfutások előkovácsolás és készrekovácsolás esetében, $\mu=0,3$ súrlódási együtthatóval; a legyártott darabon; és $\mu=0,7$ súrlódási együtthatóval.

A két súrlódási esetet a valódi állapottal összehasonlítva egyértelműen megállapítható, hogy mindkét szimuláció jó közelítéssel adta meg az előkovácsolás során kialakuló szálfutásokat, ugyanakkor enyhe különbségek megfigyelhetők. A valós esetben a zömítés során kialakuló alulra toltott hordósodás hatására a szálak enyhén lentebb indulnak el oldalirányba a szerszám geometriát követve, mint a szimulált esetekben. Az érintett területeket „A” jelöli az ábrán.

A másik terület, ahol megfigyelhető különbség a „B” -vel jelölt terület. Itt látható, hogy a szálak sűrűsödése eltérő a $\mu=0,3$ és $\mu=0,7$ -es esetekben. A valós eset szinte teljesen megegyezik a kisebb súrlódáshoz tartozó modellel.

A harmadik terület, ahol megfigyelhető a más paraméterek melletti alakítás okozta eltérés „C” -vel van jelölve az ábrán. Itt is a valódi mintával összevetve a $\mu=0,3$ -as eset közelíti meg jobban a valóságot. A modellel összehasonlítva a szárrész irányába áramló térfogat a süllyeszték fala mentén enyhén elhajlik, ahogy feltölti az üreget, míg a nagyobb súrlódás esetében a szálak egyenesek maradnak, mivel áramlás közben a hevített darab nem tud elcsúszni a felületen a nagyobb ébredő erő miatt.

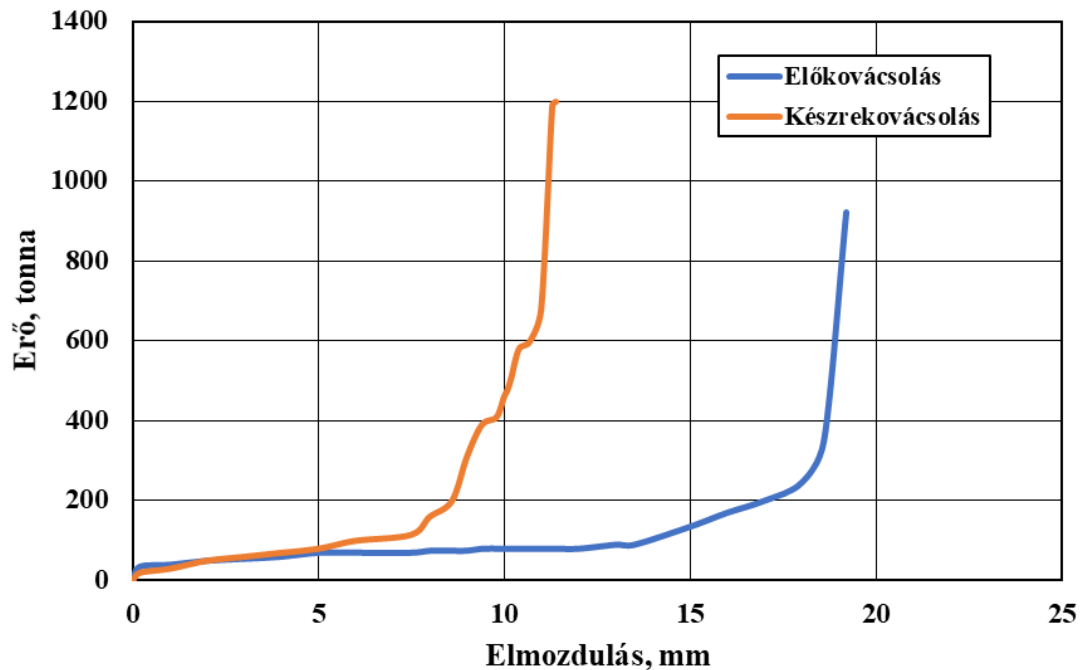
A fentiek alapján egyértelműen megállapítható, hogy a szimuláció remekül visszaadta a gyakorlati gyártásban elért eredményeket az előkovácsolás során. Ezenkívül megállapítható, hogy a kovácsolás körülményei ebben a lépésben, a súrlódásra való tekintettel jól jellemezhetők a $\mu=0,3$ -as értékkel, ami jó kenési állapotot mutat.

6.3 Készrekovácsolt darabok összehasonlítása

A 8. ábrán a gyártott darab és a különböző súrlódási értékekkel lefutott szimulációk szálfutásai kerülnek összehasonlításra az előkovácsolt és készrekovácsolt darab esetében. Az eddigiekben ismertetett zömítés során kialakuló nagyobb hordósodás nyoma a készre kovácsolt darabon is fellelhető a valós esetben. Az „A”-val jelzett területen látható, hogy a szálak kinyomódása pár milliméterrel alacsonyabbról indul ki a szimulált esetekhez képest. A zömítés hatására lentebb tolódott hordósodás hatása tovább nyomon követhető a kovácsdarabon, a „B”-vel jelzett szakaszon. A valós esetben a szálak kevésbé tömörödtek a felső szerszám irányába, inkább középre orientálódtak. A „C”-vel jelölt esetben a két súrlódási esetet összehasonlítva a tényleges darabbal a valóság a kettő között van szálfutásilag. Ez jellemző a geometria sarkos részein a legtöbb esetben. Ez alapján a valós súrlódás $\mu = 0,3$ és $\mu = 0,7$ közötti érték a kovácsolt darab és a szerszám között az alakítás során. Az ábrán „D” betűvel jelölt sarok rész esetén egyértelműen a $\mu=0,3$ -as eset áll közelebb a mintához, az előkovácsolás során kialakuló elhajlott szálak miatt. A készrekovácsolás esetén is megállapítható, hogy a szimulációs módszer kielégítő eredményességgel tudja meghatározni a valós várható szálfutást.

7 Elő- és készrekovácsolás erőszükségletének összehasonlítása a gyártásban jellemző értékekkel

Az egyes szimulációk elkészítése során a szerszám elmozdulásának hatására ébredő erőket tartalmazó adatsorokat lementettük. Az ezekből készült diagram a 9. ábrán látható, mind az előkovácsolásra, mind a készrekovácsolásra vonatkozóan. A bemutatott adatsorok a $\mu=0,3$ -as súrlódási állapothoz tartozó modellekből kerültek kiemelésre.



9. ábra. Előkovácsolás és készrekovácsolás során számított ébredő erő a szimulációk során.

A gyakorlatban a kovácsprések jellemző adata a gép által kifejthető maximális nyomás tonnában. Az előkovácsolás során a végállapothoz tartozó erő 921 tonna volt, míg a készrekovácsolás esetében ez 1195 tonna értékben került kiszámításra. A modellezett adatokat a gyártásban használt kovácsgép által szolgáltatottakkal összevetve megállapítható, hogy a program kiváló közelítéssel adta meg a várható erőt, mivel a gyakorlati tapasztalat az előkovácsolás esetében átlagosan 950 tonnát mutat, míg készrekovácsolás során 1150-1250 tonna között szokott alakulni az adott hőmérsékletek, szerszámkopási állapotok és beállítási paraméterek alapján [8].

8 Összefoglalás

A vizsgálatok során a végesselemes modellezés segítségével sikeresen elkészült az ipari körülmények között történő kovácsolással megegyező, illetőleg jól közelítő modell, ami a gyártástechnológia támogatásában nagy segítség. A zömítésre vonatkozóan fedezhetők fel eltérések a valós és számított eredmények között, ugyanakkor itt a zömítő síkok kopása és a termikus fáradás okozta egyenetlenségek generáltak olyan túlzott tapadást, ami a normál szerszámgeometria esetén nem fordul elő. Mind az elő- és készrekovácsolás esetén a modellben létrejövő kovácsolt geometriák megfelelnek a valóságnak, a darabokra illesztett szálfutási vonalak pedig jól jellemzik a ténylegesen kovácsolt alkatrészből készített minták maratott felülete által megadott valós alakváltozási állapotot. A szimuláció segítségével közelítőleg megállapítható volt, a kovácsolási lépések során fennálló súrlódási állapot a gyártási körülmények során. A zömítés során kenőanyag alkalmazására nem került sor, az alakítást végző síkokra csupán rá van helyezve az 1280 °C-ra hevített anyag. Ugyanakkor az elő- és készrekovácsolás során a szerszámok felülete sűrítettlevegős porlasztófejeket keresztül, grafit szuszpenzióból álló kenőanyaggal kerül bepermetezésre, a szerszám és alapanyag közti tapadás

csökkentésére és az áramlás könnyebbé tételére. A modellezés során két sűrűlódási állapot mellett lefutott szimuláció került összehasonlításra a valós állapottal, így megállapító volt, hogy a szálfutások alapján a kovácsolás jó kenési körülmények között folyik. A program a száraz körülményekhez $\mu=0,7$ sűrűlódási együtthatót ajánl, míg megfelelő kenés esetében $\mu=0,3$ -at. A jobb kenési állapothoz tartozó szálfutás jellemezte jobban mind az előkovácsolás, mind a készrekovácsolás valós mintáit.

Irodalom

- [1] A. S. Semiatin, *ASM Handbook, Forming and Forging*, vol. 14, ASM International, 1996. [Online]. Available: https://www.academia.edu/116230936/Volume_14_Forming_and_Forging
- [2] Szabó L., “Süllyesztékes kovácsolás”, Miskolc, 1997. [Online]. Available: <https://mek.oszk.hu/01200/01201/html/kov3.htm>
- [3] S. Fujikawa, H. Yoshiaka, and S. Shimamura, “Cold- and warm-forging applications in the automotive industry”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 35, pp. 317–342, 1992, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90325-m](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90325-m)
- [4] “Finite element method”, 2 November 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method
- [5] ZF Material Delivery Conditions for ZF64 Steel (41CrS4 Modified), [Online]. Available: https://swisssteel-group.com/content-media/documents/Data-Sheets/Engineering-Steel/41CrS4_en.pdf
- [6] M. Tisza, P. Z. Kovács, and Zs. Lukács, *Számítógépes technológiatervező rendszerek folyamatmodellezése*, Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2010.
- [7] D. C. Zipperian, *Metallographic Handbook*, PACE Technologies, Tucson, Arizona USA, pp 28 – 32, pp 139 – 140, 2011. [Online]. Available: https://www.metallographic.com/Brochures/Met-manual-2b.pdf?srsltid=AfmBOoq_qgxacUPuqEdvveOB-DC8ApqfLrFaCma36V93RJV42t6_jcwi
- [8] D. Barta, *Süllyesztékes kovácsolással előállított kovácsolt termék virtuális gyártása DEFORM programrendszer segítségével*, Diplomamunka, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2022.

NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉL ALAPANYAGOKON VÉGZETT FELRAKÓHEGESZTÉSEK DINAMIKUS IGÉNYBEVÉTELEL SZEMBENI ELLENÁLLÁSA

Terdik Gábor

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: terdikgabor@gmail.com

Meilinger Ákos

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A nagyszilárdságú acélok felrakóhegesztése egyre gyakoribb, például bontóollók esetén. Ezekre a szerkezetekre meglehetősen komplex igénybevétel jellemző, amelyek közül a dinamikus igénybevétel az egyik meghatározó. Az S690QL és az S960QL nemesített nagyszilárdságú acélok tipikusan alkalmazott alapanyagok a bontóollók leginkább terhelt részein, amelyekre nagy kopásállóságú felrakott réteg kerül. A hegesztési hőciklus hatására jelentős szövetszerkezeti változások történnek a hőhatásövezetben, amely a mechanikai tulajdonságokat is befolyásolja. A hőhatásövezet tulajdonságait alapvetően a hőbevitel határozza meg felrakóhegesztésnél is, így jelen kutatómunka során különböző hőbevitellel végeztünk felrakóhegesztést S690QL és S960QL alapanyagokon. A hőbevitel hatását műszerezett ütővizsgálattal vizsgáltuk meg, a dinamikus igénybevételekkel szembeni ellenállásra. Az eredmények alapján egyértelműek a különbségek az ütőmunka és a maximális erő értékek tekintetében is.

Kulcsszavak: nagyszilárdságú acél, S690QL, S960QL, felrakóhegesztés, hőhatásövezet, dinamikus igénybevétel

Abstract

Hardfacing of high-strength steels is becoming increasingly common, for example for demolition shears. These structures are characterized by rather complex loading, of which dynamic loading is one of the determining factors. The high-strength steels S690QL and S960QL are typically used as base materials for the most heavily loaded parts of the demolition shears, which are typically hardfaced with a highly wear-resistant layer. As a result of the welding heat cycle, significant structural changes occur in the heat affected zone, which also affects the mechanical properties. The properties of the heat affected zone are basically determined by the heat input even in hardfacing, so in this research work, hardfacing were performed with different heat inputs on S690QL and S960QL base materials. The effect of different heat inputs was examined on the resistance to dynamic stresses with instrumented impact test. The test results show clear differences in terms of impact energy and maximum force values.

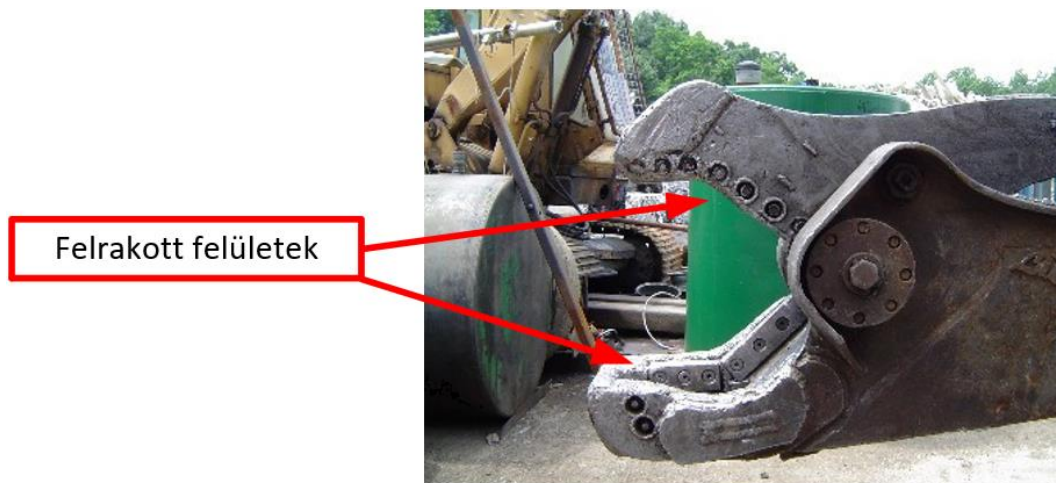
Keywords: high-strength steel, S690QL, S960QL, hardfacing, heat affected zone, dynamic loading

1. Bevezetés

A felrakóhegesztést széles körben alkalmazzák az ipar különböző területein, mint például a gépiparban, bányászatban, mezőgazdaságban vagy akár az autóiparban is, mivel hosszú távú költségmegtakarítást és a gépek, eszközök élettartamának növelését eredményezi. A technológia alkalmazása során valamilyen acél alapanyag felületére hegesztenek az adott alkatrész igénybevételének megfelelő hozaganyaggal egy, kettő vagy három réteget [1], [2]. Az esetek egy jelentős részében egy úgynevezett párnaréteg is felhegesztésre kerül, ami elősegíti a megfelelő kötés létrehozását, segít elkerülni a repedések és deformációk kialakulását, valamint javítja a felrakott alkatrész élettartamát [3], [4]. Alapanyagként a nagyszilárdságú acélok alkalmazása egyre inkább elterjed, leginkább nagyobb mechanikai igénybevétel előfordulása esetén [5]. Egy tipikus példa erre a bontóollók alkalmazása, ahol egyre nagyobb szilárdságú acélok alkalmazása jellemző, ez pedig a komplex mechanikai igénybevételeknek köszönhető. A bontóollók, mint a nehézipari munkák elengedhetetlen eszközei, különösen fontos szerepet játszanak az építőiparban, a gépjármű-bontásban, valamint az újrahasznosítási és feldolgozási folyamatokban. Ezek a nagy teljesítményű, hidraulikus meghajtású szerszámok képesek hatékonyan és precízen vágni, törni vagy szétválasztani a legkülönbözőbb anyagokat, mint például betont, vasat, acélt vagy más fémeket, amelyek a munkafolyamatok során keletkeznek. Ebből adódóan komplex igénybevételnek vannak kitéve, a következők szerint.

- Kvázi-statikusan terhelés: a bontóollók legnagyobb igénybevételét a vágás közben fellépő erők jelentik, amikor az olló pengéi vagy karjai ráfognak a feldolgozandó anyagra. Az erők nagysága függ a feldolgozott anyag típusától (például acél, vasbeton) és vastagságától. Ilyen terhelésnek kitéve az eszközök élel kopnak, és idővel karbantartást igényelnek.
- Dinamikus terhelés: a bontóollók gyakran dinamikus terhelésnek vannak kitéve, különösen akkor, amikor nehezen hozzáférhető vagy nagy ellenállású anyagokat kell megsemmisíteni. Az ütés akkor következik be, amikor a nyitott ollók hirtelen átvágják az anyagot, ami gyors és erőteljes ütközést eredményez. Egyes esetekben a dinamikus terhelés hirtelen fellépése okozhatja a legnagyobb igénybevételt az eszközökön, ami nagyfokú deformációt vagy törést jelenthet az adott szerkezeti elemekben.
- Csavaró és hajlító igénybevételek: a bontóolló működése közben gyakran keletkeznek csavarással vagy hajlítással járó terhelések, különösen akkor, ha a felhasználó nem teljesen pontosan állítja be az eszközt. A vágandó anyag elmozdulása vagy a nem megfelelően pozicionált olló miatt az eszköz vágás közben elhajolhat vagy csavarodhat. Az ilyen típusú terhelések, különösen, ha rendszeresen jelentkeznek, szerkezeti károsodást okozhatnak a bontóolló karjaiban.
- Fáradási terhelés: a bontóollók élettartamuk során ciklikusan ismétlődő igénybevételnek vannak kitéve. Ez a típusú igénybevétel a hosszú távú használat következménye, és emiatt az eszköz különböző alkatrészein repedések keletkezhetnek, amelyek a dinamikus igénybevétel hatására gyorsan terjedhetnek. Ebből adódóan az eszköz élettartama jelentősen csökkenhet és a vágási képessége is romlik.

Az 1. ábra mutat példát egy használt, felújításra vagy cserére szoruló bontóollóról. Jól látható, hogy a jelentős igénybevételek miatt a nagyszilárdságú acélok alkalmazása indokolt, viszont a felrakóhegesztési technológiát is ennek megfelelően kell megválasztani.



1. ábra. Használt bontóolló [6].

A nagyszilárdságú acél alapanyag hegesztésekor a hőhatásövezetben (heat affected zone = HAZ) jelentős változások zajlanak, amelyek következményeként általában kilágyulással [7], [8] és ezzel együtt káros szövetszerkezeti változásokkal kell számolni [9], [10]. A hőhatásövezeti zónákban különböző változások mennek végbe a hegesztési így a felrakóhegesztési hőciklus hatására.

- Durvaszemcsés hőhatásövezeti sáv (*course-grained heat affected zone = CGHAZ*): a varrathoz a legközelebb eső zóna, amiben a nagyobb hőmérséklet miatt szemcsedurvulás következik be, ami szilárdságcsökkenéshez vezethet.
- Finomszemcsés hőhatásövezeti sáv (*fine-grained heat affected zone = FGHAZ*): átkristályosodott, finomszemcsés szövetszerkezetű zóna, amelynek a keménysége elmarad az alapanyagétól.
- Részleges átkristályosodási hőhatásövezeti sáv (*intercritical heat affected zone = ICHAZ*): jellemzően a legnagyobb kilágyulással rendelkező zóna, így általában a legkritikusabb a nagyszilárdságú acéloknál.
- Kilágyulási hőhatásövezeti sáv (*subcritical heat affected zone = SCHAZ*): ebben a zónában az újrakristályosodás, valamint a martenzit megeresztődésének következményeként kisebb szilárdság jellemző, mint az alapanyagban [9], [10].

A felsorolásból jól látható, hogy nagyszilárdságú acél alapanyagok kötőhegesztése és felrakóhegesztése esetén a kilágyulás jelenti a legnagyobb problémát, ami jelentős szilárdságcsökkenést okoz [7]–[10]. Ennek mértékét lehet befolyásolni a hegesztéstechnológiai paraméterek gondos megválasztásával.

Jelen kutatómunka célja, hogy felmérje a különböző felrakóhegesztési technológiák hatását a felrakott anyagok dinamikus viselkedésére, különböző szilárdságú alapanyagokon, koncentrálna a hőhatásövezet tulajdonságaira.

2. Az alkalmazott alapanyagok

A kutatómunka során két különböző alapanyagot használtunk fel: S690QL jelű nemesített nagyszilárdságú acélt (gyártó: Azovstal), valamint S960QL jelű, szintén nemesített nagyszilárdságú acélt (gyártó: Dillinger). Mindkét alapanyag vastagsága 25 mm volt, az említett bontóollók esetén ettől nagyobb vastagságot nem használnak. Felrakóhegesztéskor szükség lehet párnaréteg alkalmazására is

a kedvezőbb kötéstulajdonságok elérése érdekében [11], [12], különösen akkor, ha az alapanyag és a felrakott réteg anyaga jelentősen eltér, valamint túl nagy maradó feszültségekre lehet számítani (például előmelegítés elhagyásakor). Jelen esetben a felrakott réteg meglehetősen rideg, valamint az alapanyag is érzékeny a hegesztési hőciklusra, így egy szívós párnaréteg alkalmazása indokolt. Ebből adódóan a Lincoln Electric által gyártott LNM19 típusú párnaréteg hegesztőanyagot használtunk, amelynek szabványos besorolása: G CrMo1Si, az MSZ EN ISO 21952 szabvány [13] szerint. Ezzel biztosítható a lágy, jó szívósággal rendelkező, valamint költséghatékony párnaréteg. A felrakott réteg anyaga nagy keménységű és kopásállóságú, viszont meglehetősen rideg. Ez szintén Lincoln Electric gyártmány, a típusa pedig Carbofil A600, az EN 14700 szabvány szerint [14] S FE8 besorolású felrakó hozaganyag.

Az 1. táblázat mutatja az alapanyagoknak, a párnaréteg anyagának, valamint a felrakott réteg anyagának kémiai összetételét, a 2. táblázatban pedig az alapanyagok mechanikai tulajdonságainak az összesítése látható. A párnarétegre és a felrakott rétegre vonatkozóan mechanikai tulajdonságokat nem közölt a műbizonylat. A táblázatokban található adatok az adott műbizonylatokban szereplő értékek.

1. táblázat. Az alapanyag, a párnaréteg és a felrakott réteg kémiai összetétele [tömeg%]

Jelölés	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni
S690QL	0,150	0,230	1,100	0,013	0,003	0,580	0,050	0,210	0,660
S960QL	0,160	0,277	1,060	0,009	0,001	0,198	0,026	0,500	0,044
LNM19	0,100	0,650	0,970	0,003	0,009	1,180	0,010	0,460	0,020
Carbofil A600	0,470	2,980	0,390	0,020	0,001	9,150	0,060	N/A	0,170

2. táblázat. Az alapanyag mechanikai tulajdonságai

Alapanyag	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]	R _m * A [MPa * %]
S690QL	777	711	18	13986
S960QL	1038	1001	15	15570

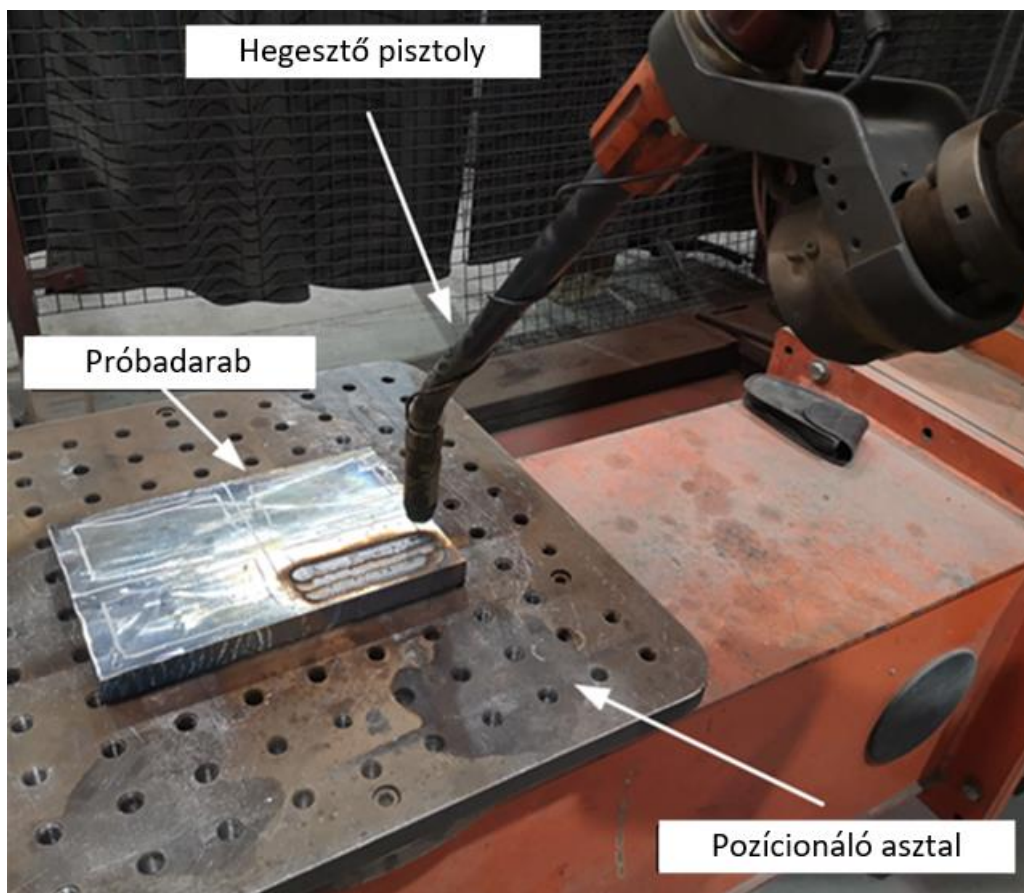
3. Alkalmazott hegesztéstechnológia

A felrakóhegesztési kísérletek elvégzéséhez huzalelektrodás, védőgázos ívhegesztést használtunk, ami az MSZ EN ISO 4063 [15] szerint a 135 kódszámú hegesztő eljárás. A hegesztést Cloos hegesztő robotrendszerrel végeztük el, ezzel biztosítva a pontos pozicionálást, egyenletes hegesztési sebességet és ezzel együtt a reprodukálhatóságot. A hegesztési védőgáz minden esetben 80% argon és 20% CO₂ keverék volt. A hőbevitel hatásának összehasonlítása is célja volt a kísérletsorozatnak, így négy különböző hegesztési paramétert (1-4.) alkalmaztunk, amelyek különböző hőbevitelt és t_{8/5} hűlési időt eredményeztek. A hegesztési paramétereket a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. A kísérletekhez használt hegesztési paraméterek

Paraméter sorszáma	Hegesztőáram [A]	Ívfeszültség [V]	Hegesztési sebesség [cm/min]	Hőbevitel [kJ/mm]	t _{8/5} [s]
1.	130	17,2	160	0,67	4,7
2.	170	19,2	210	0,75	5,3
3.	220	21,3	250	0,90	6,4
4.	280	26,7	280	1,28	9

Az 1. sorszámú hegesztési paraméterkombináció alkalmazásával kis hőbevitellel még elfogadható minőségű kötést lehetett létrehozni, megfelelő beolvadással. A 4. sorszámú hegesztési paraméterkombinációval pedig mély beolvadást lehetett elérni, de ettől nagyobb hőbevitel esetén már repedések jelentek meg a felrakott rétegben, így a hőbevitel felső határát ez a kombináció adta. Az előzetes gyártási tapasztalatok alapján előmelegítési és rétegeközi hőmérsékletnek is 120 °C-ot alkalmaztunk. Hegesztési paraméterkombinációnként 100 mm x 150 mm méretű felületen végeztük el a felrakóhegesztést. A 2. ábra mutatja a hegesztési elrendezést.



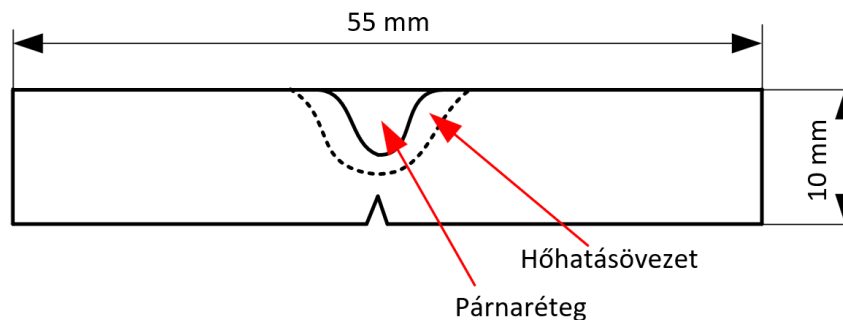
2. ábra. A hegesztőrobot és a munkadarab elrendezése.

Párnarétegből egy réteg került felhegesztésre, míg a felrakott rétegből három készült.

4. Vizsgálati körülmények

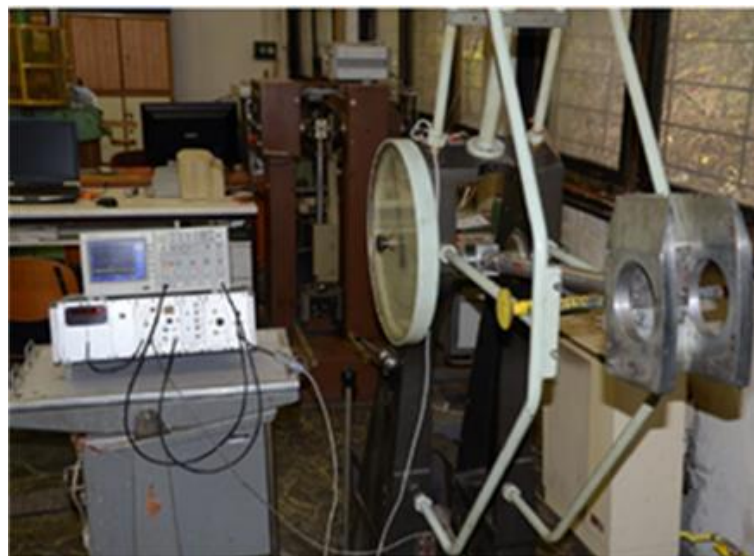
Előzetes optikai mikroszkópos és keménységmérési eredmények alapján [16] egyértelművé vált, hogy a különböző hőbevitellel hegesztett darabok eltérő hőhatásövezettel és beolvadási mélységgel rendelkeznek. Az elkészült darabokról lemunkáltuk a párna- és felrakórétegeket úgy, hogy csak az alapanyag és azzal együtt a hőhatásövezet, valamint a beolvadt párnaréteg maradjon meg. Az alapanyag felületétől nézve 10 mm x 10 mm méretű hasábokat munkáltunk ki. Ezt követően meg kellett határozni a beolvadás pontos helyét, így 2%-os Nital oldattal maradtunk meg a hasábok felületét.

A beolvadás helyének meghatározása után bejelöltük a bemetszés helyét, amit minden esetben a beolvadás legmélyebb pontjához illesztettünk. Ezt követően kimunkáltuk a bemetszést és 55 mm hosszúságúra vágtuk a hasábot, így kialakítva a szabványos Charpy-V ütővizsgálati próbatestet. A 3. ábra mutatja a próbatest méretet (10 mm x 10 mm x 55 mm) és a (2 mm-es) bemetszés helyét.



3. ábra. Az ütőpróbatétel méretei és a bemetszés helye.

A vizsgálatokat műszerezett Charpy-féle ütőművön végeztük el, amelyet a 4. ábra mutat.

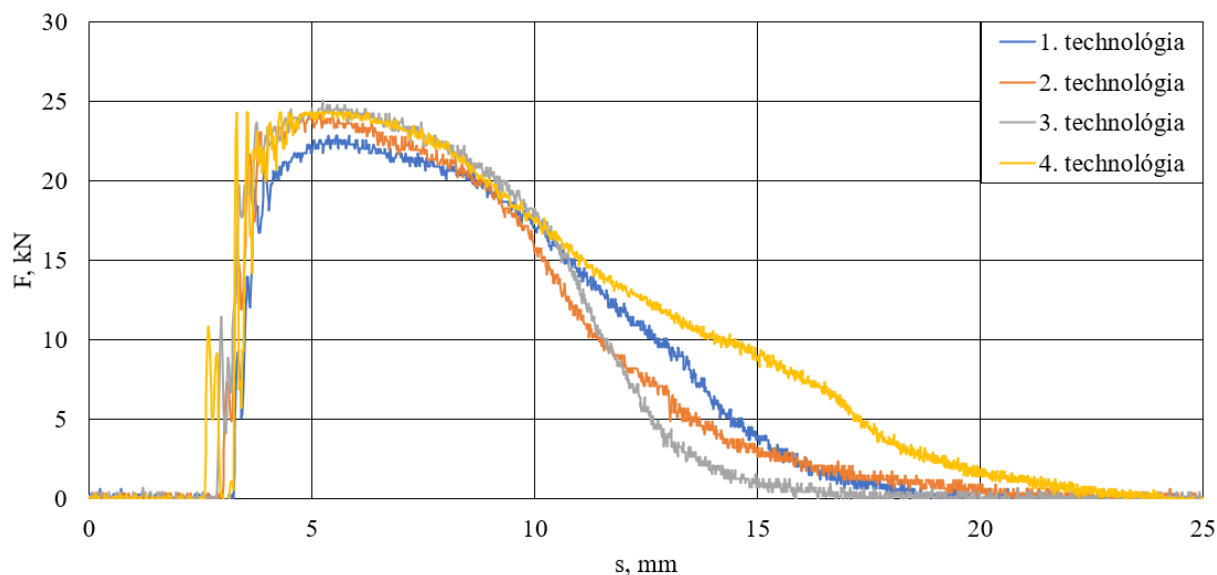


4. ábra. A felműszerezett Charpy-féle ütőmű

Az ütőkalapács nyúlásmérő bélyegekkel volt felszerelve, amelyek feszültségértékeit erővé lehet konvertálni (a nyúlásmérő bélyegek kalibrálása után), így erő-elmozdulás (F-s) diagramokat lehetett felvenni az ütés során. Emellett az ütőmű méri az adott ütőmunka értéket is. Az ütővizsgálat során 2500 mintavétel történik 5 ms alatt. Mindegyik technológia/alapanyag kombinációból 3-3 darab próbatestet vizsgáltunk meg. A vizsgálatokat 20 °C-on végeztük.

5. Vizsgálati eredmények

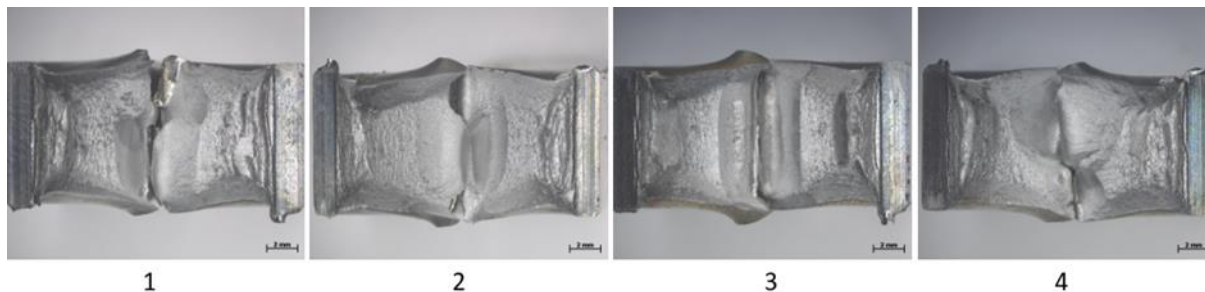
Az S690QL jelű alapanyag esetén elvégzett Charpy-féle ütővizsgálat erő-elmozdulás diagramjait mutatja az 5. ábra. (Minden technológiánál 3-3 diagram készült, ebből 1-1 látható az 5. ábrán.)



5. ábra. Erő-elmozdulás diagramok az S690QL alapanyagon.

Az ábrán jól látszik, hogy nincsenek jelentős különbségek a maximális erő tekintetében, azok 23 kN és 24,5 kN között változnak a különböző technológiáknál. Figyelemre méltó viszont az elmozdulások 10–20 mm közötti része, ahol jelentős eltérés tapasztalható, ami az ütőmunka értékekre is hatással lehet. Ez a rész leginkább a felrakott réteg beolvadási mélységétől függ.

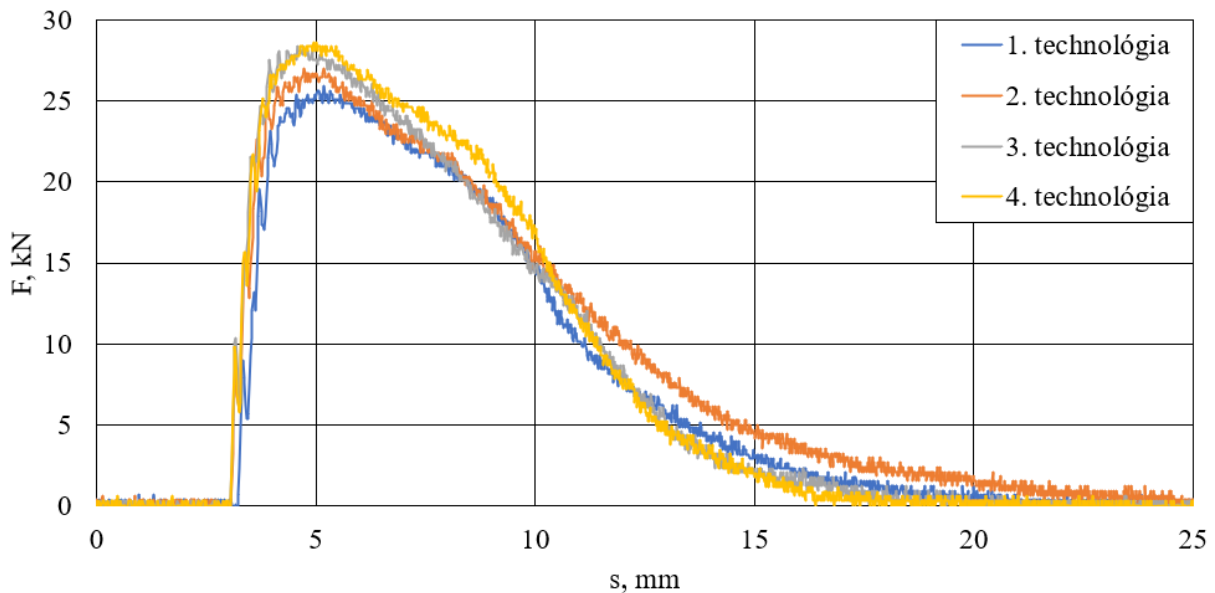
A 6. ábra mutatja az S690QL anyagminőségű darabok töretfelületeit.



6. ábra. Az ütőpróbatestek töretfelületei a különböző technológiák alkalmazásakor S690QL alapanyag esetén.

A töretfelületeken jól kivehető, hogy meglehetősen heterogén a töret, ami annak köszönhető, hogy alapanyagot, hőhatásövezetet és varratot is tartalmaz minden esetben. Mindegyik töretfelület szívós anyagra utal.

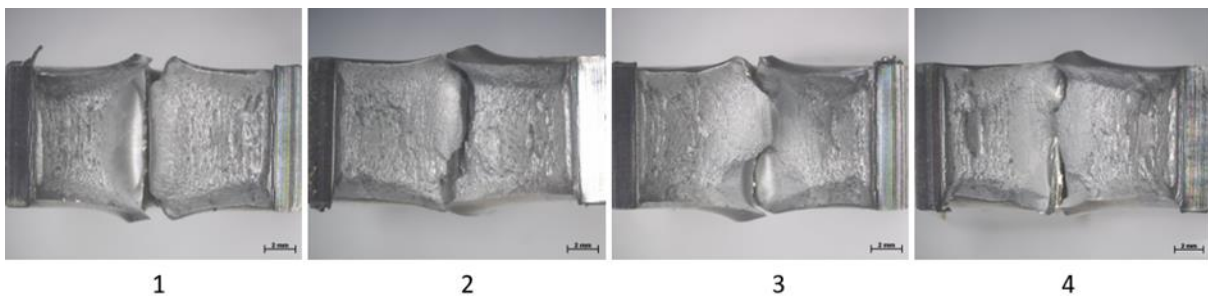
A 7. ábra mutatja az S960QL alapanyagon végzett ütővizsgálat erő-elmozdulás görbéit különböző technológiáknál.



7. ábra. Erő-elmozdulás diagramok az S960QL alapanyagon.

Ezen az ábrán már megfigyelhető különbség a maximális erők között a különböző technológiák esetén. A kis hőbevitelt alkalmazó technológiáknál (ahol kicsi a beolvadás) az erő is kicsi, viszont a nagyobb hőbevitelűeknél (ahol mélyebb a beolvadás) már nagyobb. A görbék második szakasza jóval kisebb különbségeket mutat, mint az S690QL esetén. Megállapítható, hogy szignifikánsan nagyobb erők adódtak ennél az alapanyagnál, mint az S690QL esetében.

A 8. ábra mutatja az S960QL anyagminőségű darabok töretfelületeit. A töretfelületek ebben az esetben is jelentős különbségeket mutatnak, igaz, mindegyik töret szívós anyagra utal.

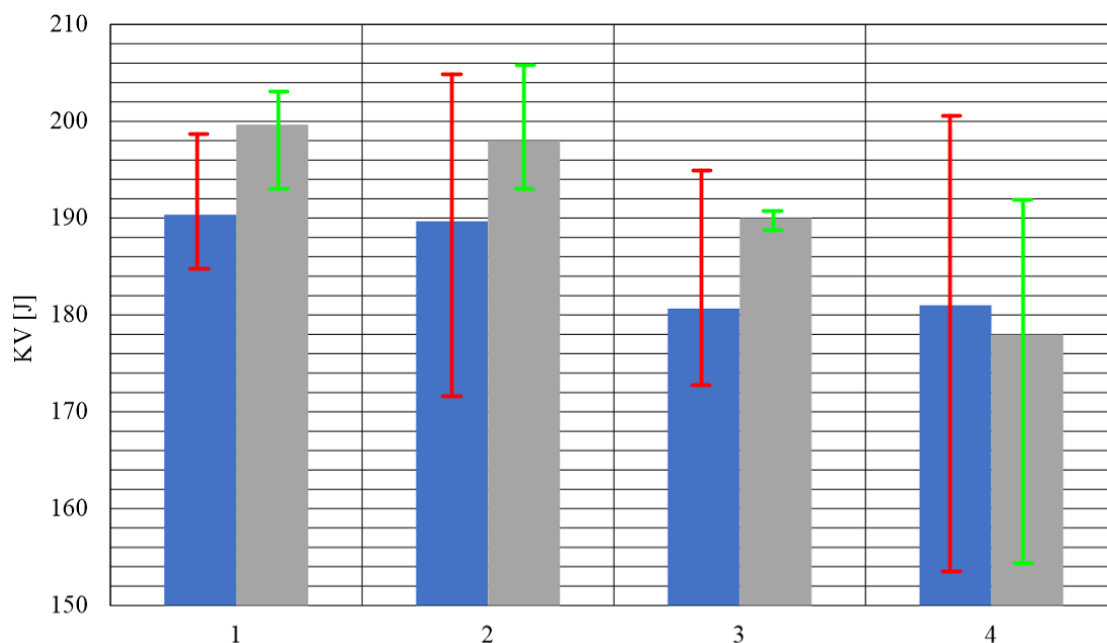


8. ábra. Az ütőpróbatestek töretfelületei a különböző technológiák alkalmazásakor S960QL alapanyag esetén.

A 9. ábra összesíti az ütőmunka értékeket az S690QL (szürke oszlopok) és az S960QL (kék oszlopok) esetén szórással együtt.

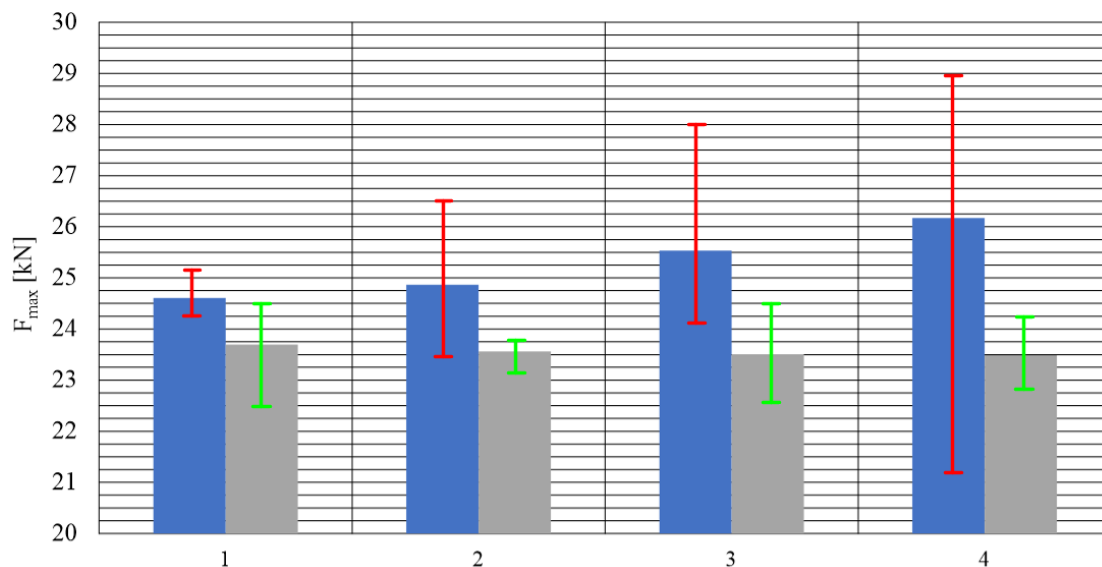
Az ábrán látszik, hogy a hőbevitel értékének növelésével csökkent az ütőmunka értéke mindkét alapanyagnál. Az 1, a 2 és a 3 technológiánál az S690QL alapanyag esetén nagyobbak voltak az ütőmunka értékek, mint az S960QL esetén. A 4. technológiánál nagyon hasonlóak voltak az értékek, ami valószínűleg a nagy beolvadási mélységnek köszönhető, amely következtében az alapanyag tulajdonságai már csak kis mértékben befolyásolhatták az értékeket. Emellett megfigyelhető, hogy az

S690QL alapanyag esetében a szórás is kisebb, mint az S960QL-nél. A legnagyobb szórás mindkét esetben a 4. technológiánál volt megfigyelhető.



9. ábra. Az ütőmunka értéke S690QL (szürke) és S960QL (kék) alapanyagok esetén különböző felrakóhegesztési technológiáknál.

A 10. ábra foglalja össze a maximális erő értékeit a különböző felrakóhegesztési technológiáknál S690QL és S960QL esetén. A szürke oszlopok az S690QL-t, míg a kékek az S960QL-t jelölik.



10. ábra. A maximális erő értéke S690QL (szürke) és S960QL (kék) alapanyagok esetén különböző felrakóhegesztési technológiáknál.

A maximális erő értékeket figyelembe véve egyértelműen az S960QL alapanyag esetén nagyobbak az értékek. Ahogy a hőbevitel növekszik, úgy növekszik a maximális erő értéke is ebben az esetben. Az S690QL alapanyagnál közel azonos maximális erő értékeket mértünk mindegyik technológia esetén. Szintén megfigyelhető, hogy a szórás mértéke jóval kisebb (egy kivétellel) az S690QL esetén, mint az S960QL-nél, ahol a legnagyobb hőbevitel eredményezte a legnagyobb szórást.

6. Összefoglalás

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján az alábbi következtetéseket lehet levonni:

- A 20 °C-on végzett Charpy-féle ütővizsgálatok alapján meg lehet fogalmazni különbségeket a felrakóhegesztési technológiák között S690QL és S960QL alapanyagok esetén is.
- S690QL alapanyagnál az erő-elmozdulás diagramok eltérnek az elmozdulások 10- mm és 20 mm közötti tartományban, ami valószínűleg a jelentősen eltérő hőbevitel és a beolvadási mélység következménye. Emellett a maximális erő értéke alig-alig változik. A töretfelület meglehetősen heterogén, ami abból adódhat, hogy alapanyagot, hőhatásövezetet és varratot is érint.
- S960QL esetén az erő-elmozdulás diagramok jellege hasonló, viszont a maximális erő értékekben nagyobb különbség látható. A töretfelület szintén heterogén.
- Az ütmunka értékek tekintetében az S690QL alapanyag esetén a kisebb hőbevitelű technológiáknál nagyobbak az értékek, mint az S960QL esetén. A legnagyobb hőbevitelű technológiánál jelentős különbség nem tapasztalható az ütmunka értékben a két alapanyag között, ami valószínűleg a mély beolvadás következménye.
- A maximális erő értékek mindegyik vizsgált technológiánál egyértelműen nagyobbak az S960QL esetén, mint az S690QL-nél. Az erő értéke egyértelműen növekszik a hőbevitel növekedésével S960QL-nél, míg S690QL esetén nincs különösebb változás.
- Az ütmunka és a maximális erő szórása is nagyobb az S960QL technológiáknál, mint az S690QL esetén.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program – Kooperatív Doktori Programja keretében, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott támogatással készült.

Irodalom

- [1] C. Jindal, B. S. Sidhu, P. Kumar, and H. S. Sidhu, "Performance of hardfaced/heat treated materials under solid particle erosion: A systematic literature review", *Mater. Today: Proc.*, vol. 50, pp. 629–639, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.441.
- [2] D. Arsi et al., "Weldability Assessment of Various Steels by Hard-Facing", *Mater.*, vol. 15, 3082, 2022, doi: 10.3390/ma15093082.
- [3] K. Piotr, S. Tomasz, K. Aleksandra, and S. Paweł, "Wear of cultivator coulters reinforced with cemented-carbide plates and hardfacing", *Wear*, pp. 438–439, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.203063.
- [4] S. K. Amardeep, S. Gurjinder, and S. C. Gurmeet, "Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel", *Mater. Today: Proc.*, vol. 4, pp. 7991–7999, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.136.

- [5] D. Tandon, H. Li, Z. Pan, D. Yu, and W. Pang, “A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works”, *J. Met.*, vol. 13, 1512, 2023, doi:10.3390/met13091512.
- [6] <https://www.hardfacetechnologies.com/products/postalloy-242>, 2024.11.10.
- [7] J. Kovács, and J. Lukács, “Influence of Filler Metals on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Metal Arc Welded High Strength Steel”, *Lect. Notes Mech. Eng.*, VAE, vol. 4, pp. 995–1005, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-15211-5_83.
- [8] Á. Dobosy, “S690QL és S960M nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseinek fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása”, *Multidiszciplinális tudományok*, vol. 10, pp. 156–166, 2020, doi: 10.35925/j.multi.2020.1.19.
- [9] M. Gáspár, “Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel,” *Metals*, vol. 9, no. 1226, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/met9111226.
- [10] J. Kovács, and J. Lukács, “Effect of the Welding Thermal Cycles Based on Simulated Heat Affected Zone of S1300 Ultrahigh Strength Steel”, *Key Eng. Mater.*, vol. 890, pp. 33–43, 2021, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.890.33.
- [11] S. Buntoeng, Z. Hein, P. Salita, and M. Prapas, “The effects of dilution and choice of added powder on hardfacing deposited by submerged arc welding”, *Wear*, vol. 424–425, pp. 246–254, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.02.027.
- [12] M. Balakrishnana, V. Balasubramanian, G. Madhusuhan, and K. Sivakumar, “Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints”, *Mater. Des.*, vol. 32, pp. 469–479, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.037.
- [13] *Hegesztőanyagok. Huzalelektrodák, hegesztőhuzalok, hegesztőpálcák és hegesztési ömledék melegszilárd acélok védőgázos ívhegesztéséhez. Osztályba sorolás*, MSZ EN ISO 21952, 2012.
- [14] *Hegesztőanyagok. Hegesztőanyagok keményfelrakó hegesztéshez*, MSZ EN 14700, 2023.
- [15] *Hegesztés, forrasztás és termikus vágás. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk*, MSZ EN ISO 4063, 2023.
- [16] G. Terdik, and Á. Meilinger, “Investigation of Hardfacing on Ultra-High Strength Steel Base Material”, *Mater. Sci. Forum.*, vol. 1095, pp. 89–96, 2023, doi: 10.4028/p-0uAKUY.

AZ IMPULZUSTECHNIKA HATÁSA AZ MS1400 ALAPANYAGON VÉGZETT ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTETT KÖTÉSEK SZÖVETSZERKEZETÉRE

Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: sahm.alden@uni-miskolc.hu

Meilinger Ákos

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A martenzites ultra-nagyszilárdságú acélokat egyre gyakrabban alkalmazzák az iparban, különösen olyan vékonyfalú szerkezeteknél, mint az autókarosszéria. Ebben az esetben az alapanyagok jellemző folyáshatára 1000 MPa-nál is nagyobb lehet, ami alapvetően a döntően martenzites szövetszerkezet miatt van. Egy jellemző kötéstechológiája ezen acéloknak az ellenállás-ponthegesztés, ahol a hegesztési hőciklus jelentős kilágyulást okozhat a hőhatásövezetben. A kilágyulás mértéke függ a hegesztési munkarendtől és ezzel együtt az impulzusok számától is ellenállás-ponthegesztés esetén. Jelen kutatómunkában az 1 és 2 impulzusok okozta szövetszerkezeti változások feltérképezése a cél, ezzel magyarázatot adva az eltérő mechanikai tulajdonságokra. Az eredmények értékeléséhez pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatokat végeztünk, valamint szemcseméretet mértünk a különbségek megértéséhez.

Kulcsszavak: ellenállás-ponthegesztés, impulzus technológia, nagyszilárdságú acél, martenzites acél, MS1400, szövetszerkezet elemzés

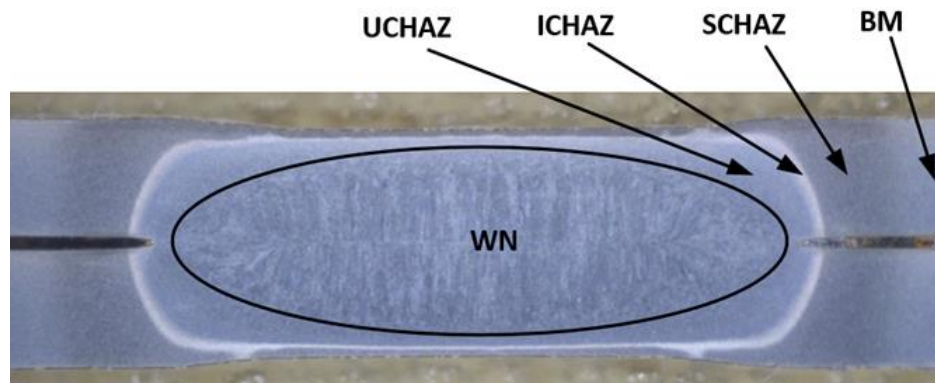
Abstract

Martensitic ultra-high strength steels are increasingly used in industry, especially for thin-walled structures such as car bodies. In this case, the typical yield strength of the base materials can be higher than 1000 MPa, which is basically due to the mainly martensitic microstructure. A typical joining technology for these steels is resistance spot welding, where the welding thermal cycle can cause significant softening in the heat affected zone. The degree of softening depends on the welding parameters and the number of pulses in the case of resistance spot welding. The aim of this research work is to map the changes in microstructure caused by pulses 1 and 2, thereby explaining the different mechanical properties. To evaluate the results, scanning electron microscopic (SEM) tests were performed and grain sizes were measured to understand the differences.

Keywords: RSW, pulse technology, UHSS, martensitic steel, MS1400, microstructural analysis

1. Bevezetés

A martenzites ultra-nagyszilárdságú acélok (*ultra-high strength steels = UHSS*) hegesztése kihívást jelent a nagy szilárdság, a repedésérzékenység és a kedvezőtlen mikroszerkezeti változások miatt [1]–[4]. A vékony UHSS lemezek esetében az ellenállás-ponthegesztés (*resistance spot welding = RSW*) a leggyakrabban alkalmazott hegesztő eljárás, ahol a hegesztési hőciklus hatására a szilárdsági tulajdonságok drasztikusan csökkennek [5]–[11], a hőhatásövezet szilárdságcsökkenése elérheti a 40%-ot is az elvárt szilárdsághoz képest [12]. Ennek oka, hogy a hegesztési hőciklus a hőhatásövezetben fázisátalakulást [2], [5], [12]–[14], esetenként szegregációt okoz. Ennek mértéke eltérő a hőhatásövezetben, ezért különböző alzónákat különböztetünk meg: durvaszemcsés hőhatásövezeti zóna (*upper-critical heat affected zone = UCHAZ*), részleges átkristályosodási hőhatásövezeti zóna (*intercritical heat affected zone = ICHAZ*) és kilágyulási hőhatásövezeti zóna (*subcritical heat affected zone = SCHAZ*) [2], [5], [7]–[9], amint azt az 1. ábra mutatja.



1. ábra. Hőhatásövezeti zónák ellenállás-ponthegesztett kötésnél: WN = heglencse, UCHAZ = durvaszemcsés hőhatásövezeti zóna, ICHAZ = részleges átkristályosodási hőhatásövezeti zóna, SCHAZ = kilágyulási hőhatásövezeti zóna, BM = alapanyag.

A heglencse (*weld nugget = WN*) a hegesztés során megolvad, majd a megszilárdulást követően alapvetően dendrites szerkezetű lesz [15]–[17], a lehűtött elektróda okozta nagyon gyors hűlés miatt. A hegesztési hőciklus nagyon gyors, ezért a martenzites UHSS esetében itt jellemzően martenzit keletkezik [2], [5], [12]. A heglencséhez legközelebbi hőhatásövezeti zóna az UCHAZ, amely nem olvad meg a hegesztés során, de a csúcshőmérséklet A_{c3} felett van [5]. Emiatt teljes ausztenitesezés is megtörténhet a hegesztés következtében [2], [5], [12], az ezt követő átalakulások a hűlés során alapvetően a hűtési sebességtől függenek [5]. A martenzites acél alapanyagok esetében ez a zóna martenzitetet is tartalmaz [5]. A szemcseméret változó, kisebb és nagyobb szemcsék is előfordulnak [2], [5], [12], a finomabb szemcsék valamivel nagyobb keménységet biztosítanak, mint a durva szemcsék [5]. A kereszt-szakító vizsgálatok esetén a törés leggyakrabban az UCHAZ-ban következik be, amint azt Tamizi közölte [5]. A következő zóna az az ICHAZ, ahol a csúcshőmérséklet A_{c1} és A_{c3} között van, így hevítés közben részleges ausztenitesezés mehet végbe, az alapanyag mikroszerkezete ferrit és ausztenit alakul. A nagy hűlési sebesség miatt az ausztenit martenzitté alakul, és ferrit-martenzit kétfázisú zóna jön létre, ami jellemzően a kötés leginkább kilágyult része [2], [5], [12], [13]. Az utolsó zóna az SCHAZ, ahol a csúcshőmérséklet az A_{c1} alatt van [5]. A szakirodalom [2], [5], [12], [13] alapján a kezdeti martenzit a hegesztési hőciklus hatására megeresztődik, és így lágyulást is okoz [14].

A szakirodalomban jellemzően 3 különböző technológia található az UHSS ellenállásponthegesztésére: kemény munkarendű hegesztés, lágy munkarendű hegesztés és impulzusos hegesztés. Kemény munkarend alkalmazása esetén a hegesztési hőciklus nagyon gyors, ami keskeny hőhatásövezetet és kicsi heglencse átmérőt eredményez [18], [19]. A lágy munkarendű hegesztés pedig széles hőhatásövezetet és nagy heglencse átmérőt okoz [18], [19]. Tehát ebben az esetben a lágyulás okozta szilárdságcsökkenést nagyobb heglencse átmérővel lehet kompenzálni. A fő különbség a hőhatásövezetben a kilágyult zóna mérete és nem a keménység értéke. Napjainkban az impulzustechnika alkalmazását egyre inkább vizsgálják nagyszilárdságú acélok esetében [7], [11], [17], [20]–[22]. Ebben az esetben az első áramimpulzus hozza létre a heglencsét, a további impulzusok pedig hőkezelik a heglencsét és a hőhatásövezetet. A korábbi kutatások szerint a keménységeloszlás szignifikáns különbségeket mutat az 1 és 2 impulzusos technológiák között [23]. Jelen kutatómunkában a keménységértékekben történt változásokra keresünk választ a 2 különböző technológiával készült kötések szövetszerkezeti elemzésével.

2. Az alkalmazott alapanyag

A martenzites (MS) acélokat martenzites szövetszerkezet jellemzi, amely kis mennyiségű ferritet és/vagy bénitet tartalmaz. Ebből adódóan rendkívül nagy szakítószilárdsággal rendelkeznek, amelynek a felső határa 1700 MPa értékű. Az MS acéloknál gyakran használnak megeresztést a jobb szívósság elérése érdekében, mellyel együtt javul az alakíthatóság is [24].

Az ultra-nagyszilárdságú hidegen alakított MS acélok általában szilíciumot és mangánt tartalmaznak nagyobb mennyiségben, de emellett mikroötvözőket is adnak hozzá. Az alacsony ötvözetartalom kis keménységet eredményez az edzés előtt és így könnyebben hengerelhető, amely eredményeként az előállítási költsége alacsonyabb, mint a többi, harmadik generációs nagyszilárdságú acélnak [24]–[26].

Ebben a kutatómunkában alapanyagként 1 mm vastag Docol MS1400 jelű acéllemezeket használtunk, amelyeket az SSAB gyártott. Az MS1400 vegyi összetételét és mechanikai tulajdonságait az 1. és 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az alapanyag vegyi összetétele [tömeg%]

Alapanyag	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
MS1400	0,220	0,460	2,460	0,016	0,003	0,030	0,120

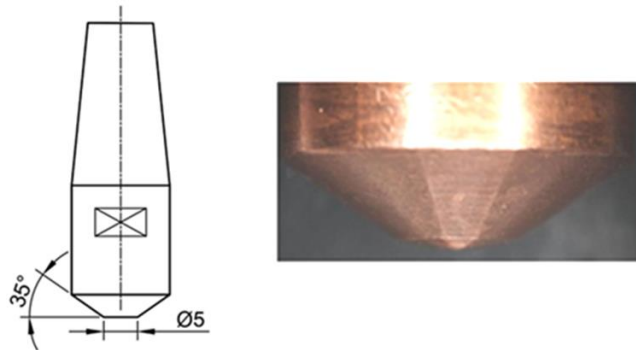
2. táblázat. Az alapanyag mechanikai tulajdonságai

Alapanyag	Folyáshatár $R_{p0,2}$ [MPa]	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Százalékos szakadási nyúlás A_{80} [%]	Keménység HV10 [–]
MS1400	1391	1496	4,5	470

3. Hegesztési körülmények

A hegesztéshez TECNA 8007 típusú váltóáramú ellenálláshegesztő berendezést használtunk TE550 vezérlő egységgel. A hegesztő elektródok anyaga CuCrZr. Csonkakúp kialakításúak és 5 mm kontakt átmérővel rendelkeztek. Az alsó és felső elektródok kialakítása megegyezett. A hegesztő erőt

pneumatikus henger biztosította, ami közvetlenül az elektródhoz kapcsolódott, így kifejtve a hegesztéshez szükséges erőt. A 2. ábra mutatja az elektród kialakítást.



2. ábra. Az alkalmazott elektród kialakítása.

A martenzites nagyszilárdságú acélok esetén alapvetően 2 fajta technológiát alkalmaznak az ellenállás-ponthegesztéshez: kemény munkarendűt és lágy munkarendűt [2], [3], [5]. A kemény munkarendű kisebb kilángulást okoz a hőhatásövezetben, de a hosszú idejű hegesztést is alkalmazzák, mert az azonos elektródacsúcs-átmérő mellett nagyobb heglencsét eredményez, és a lágyítás hatását a nagyobb heglencseméret kompenzálja. Alapvetően ezek a lágy munkarendű technológiák adták a legjobb eredményeket [2], [5]. Előzetes kísérletek végeztünk a kemény- lágy- és a 2 impulzusos technológia összehasonlítására, ahol a kemény munkarendűvel készült kötések, valamint a 2 impulzusos technológiával készült kötések voltak a legjobbak [18]. A kötések fajlagos mm²-re vonatkoztatott teherviselő képessége a 2 impulzusos technológiánál voltak a legjobbak, ahogy azt a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat. Nyíró-szakító erő értékek a lágy- és a 2 impulzusos technológia esetén

Hegesztéstechnológia	Heglencse átmérő [mm]	Nyíró-szakító erő [N]	Fajlagos nyíró-szakító erő [N/mm ²]
Lágy munkarend	7,5	17,593	398,2
	7,4	17,308	402,4
	7,4	17,475	406,3
2 impulzusos munkarend	5,3	12,609	571,5
	5,3	12,688	575,1
	5,4	13,095	571,8

Jól látható, hogy fajlagosan nagyobb terhelést viseltek el a 2 impulzusos technológiával készült kötések, mint a lágy munkarendűvel készültek. Ezekre az értékekre nagy hatással lehetnek a szövetszerkezeti változások, így ezeket a technológiákat választottuk a szövetszerkezeti vizsgálatokhoz. A tényleges hegesztési paramétereket a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. Az alkalmazott hegesztési paraméterek

Hegesztéstechnológia	Áramerősség [kA]	Hegesztési idő [ms]	Impulzusok száma	Szünetidő [ms]	Elektróderő [kN]
Lágy munkarend	8,5	320	1	–	5
2 impulzusos technológia	6,4	120	2	300	3

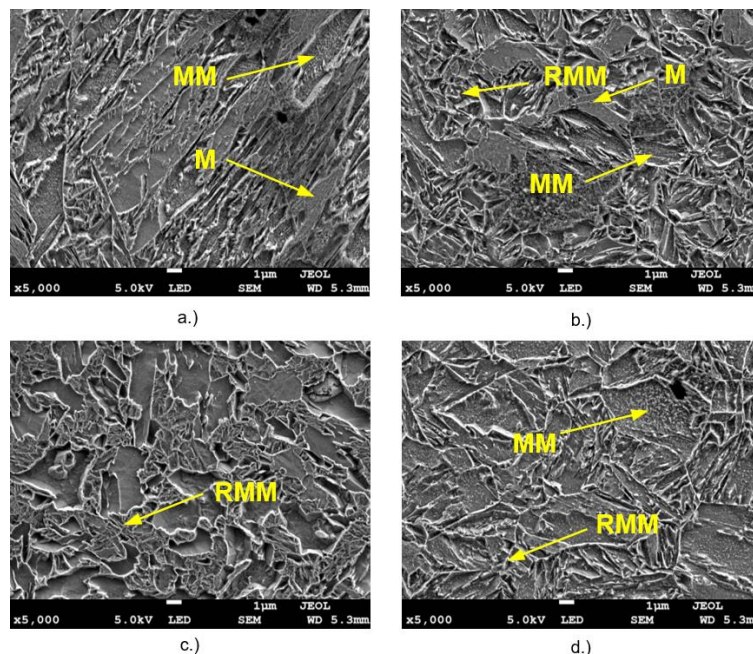
4. Vizsgálati körülmények

Az elkészített ellenállás-ponthegesztett darabokból próbatesteket munkáltunk ki a kötések közepéből. A próbatesteket előkészítése csiszolásból, polírozásból (gyémántpasztával), majd maratásból állt (2%-os Nital marószerrel). A könnyebb kezelhetőség érdekében a próbatesteket gyantába öntöttük, így a csiszolás és polírozás pontosan kivitelezhető volt.

Az elkészített próbatesteket mikroszerkezeti vizsgálatnak vetettük alá pásztázó elektronmikroszkóp (Zeiss-Sigma) használatával. A nagyítás minden esetben 5000X-es volt, 5 kV-os gyorsító feszültség alkalmazása mellett. Az elektronmikroszkóppal szövetszerkezeti képeket készítettünk a heglencséről, valamint a hőhatásövezetek különböző zónáiról mindkét próbatest esetén.

5. Eredmények

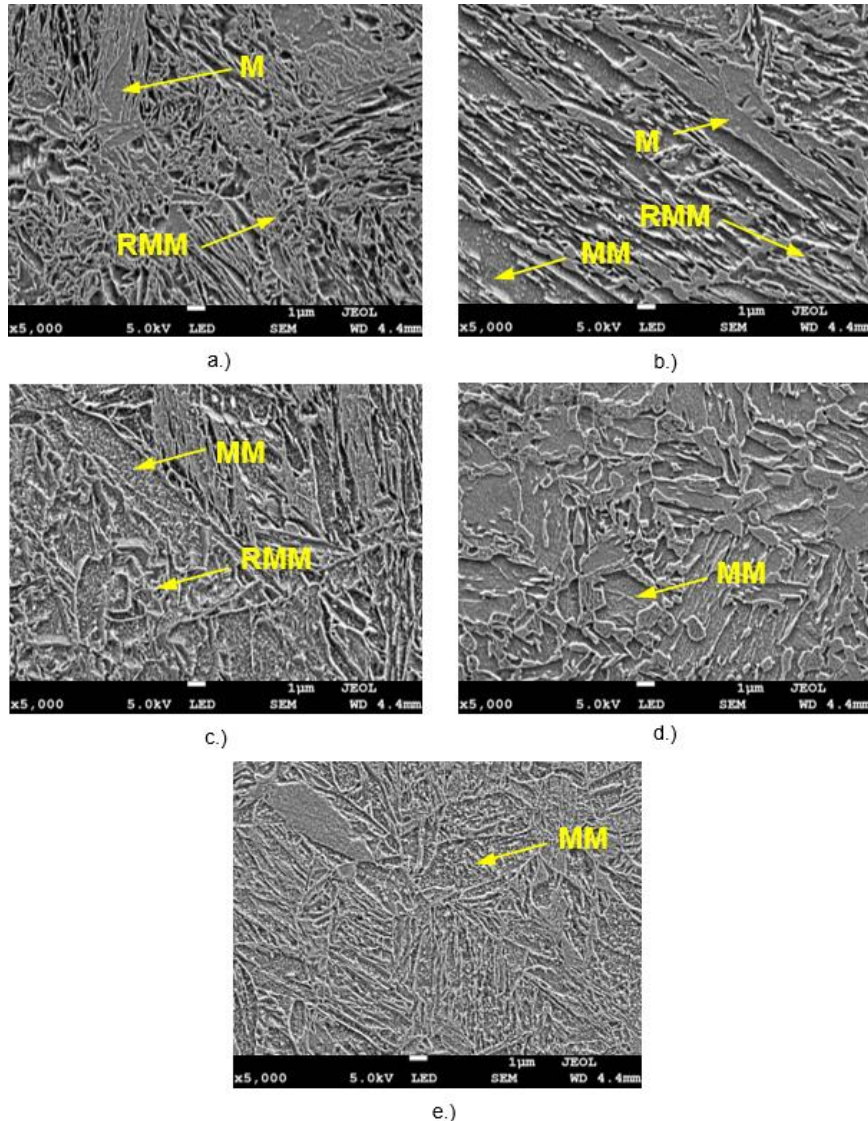
A lágy munkarenddel készült kötés pásztázó elektronmikroszkópos felvételeit a 3. ábra mutatja.



3. ábra. Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek (marószer: 2% Nital, nagyítás: 5000x) a különböző zónákban a lágy munkarendű technológia alkalmazásánál: a.) heglencse, b.) UHAZ, c.) IHAZ, d.) SCHA.

A 3. ábra a.) részén jól látható, hogy a heglencsében jellemzően martenzit (M), valamint megeresztett martenzit (MM) található. Ebből arra lehet következtetni, hogy a heglencsének nagy a keménysége, amit az előzetes vizsgálataink ki is mutattak [27]. Az UHAZ részen már jóval nagyobb mennyiségben található megeresztett martenzit, valamint részben megeresztett martenzit (RMM); a tisztán martenzites szövet mennyisége kevés, így itt a kilágyulás a valószínű. Az IHAZ-ban részben megeresztett martenzit látható a képen, valószínűleg ferrit/bénit mellett. A keménységértékek ebben az övezetben a legkisebbek. Az SCHA-ban csak részben vagy teljesen megeresztett martenzit látható, ami szintén kisebb keménységértéket eredményez, mint az alapanyag, viszont nagyobb, mint az

ICHAZ. A 4. ábra a 2 impulzusos technológiával készült kötés pásztázó elektronmikroszkópos felvételeit mutatja.

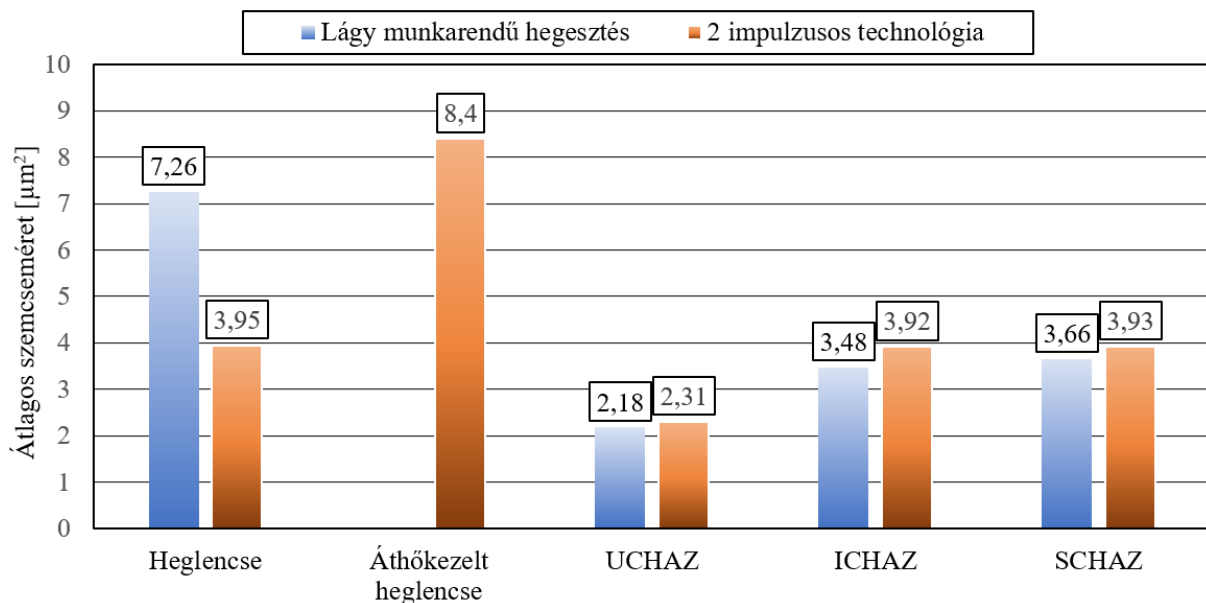


4. ábra. Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek (marószers: 2% Nital, nagyítás: 5000x) a különböző zónákban 2 impulzusos technológia alkalmazásánál: a.) heglencse, b.) áthőkezelt heglencse, c.) UCHAZ, d.) ICHAZ, e.) SCHAZ.

A 4. ábra a.) része a heglencse szövetszerkezetét mutatja, ami szintén martenzitet és részben megeresztett martenzitet tartalmaz. A 2 impulzusos hegesztés során a heglencsében felfedezhető egy áthőkezelt, gyűrű alakú rész [28], aminek a szövetszerkezete a 4. ábra b.) része mutatja. Ebből jól látható, hogy nagyobb részben megeresztett/részben megeresztett martenzitet tartalmaz és csak kis mértékben fordul elő tiszta martenzit. Ezzel magyarázható a kilágyulás [28] ebben a zónában. Az UCHAZ szinte kizárólag megeresztett/részben megeresztett martenzitet tartalmaz, ami szintén kisebb

keménységet jelent, mint az alapanyagé. Az ICHAZ hasonlít a lágy munkarendűhöz, annyi különbséggel, hogy itt csak megeresztett martenzitet láthatunk a ferrit/bénit mellett. Az SCHAZ megeresztett martenzitból áll.

A próbadarabokon szemcseméret mérést is végeztünk a különböző zónákban, amelynek az eredményét az 5. ábra mutatja.



5. ábra. Az átlagos szemcseméretetek: lágy munkarendű hegesztésnél és 2 impulzusos hegesztésnél.

Lágy munkarendű hegesztésnél a heglencse tartalmazza a legnagyobb szemcséket, míg az UCHAZ a legkisebbeket. Az ICHAZ és az SCHAZ szemcseméretei gyakorlatilag azonosak, de jóval kisebbek a heglencsében található szemcséktől és nagyobbak az UCHAZ szemcseméreteinél. 2 impulzusos technológiánál a heglencse szemcsemérete jelentősen kisebb, mint a lágy munkarendűnél, viszont az áthőkezelt heglencsében kifejezetten nagy szemcsék keletkeztek. Az UCHAZ, ICHAZ és SCHAZ szemcseméretei nem mutatnak nagy eltérést a lágy munkarendű kötés azonos zónáihoz képest.

6. Összefoglalás

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- A lágy munkarendű kötés esetén a heglencsében leginkább martenzites szövetszerkezetet találtunk, de kisebb mértékben megeresztett martenzit is előfordult. Ebből adódhat a heglencse nagyobb keménysége. A részben megeresztett martenzit és a megeresztett martenzit mennyisége egyre növekedett sorra az UCHAZ-ban, ICHAZ-ban és SCHAZ-ban. A legkisebb keménységű zóna mégis az ICHAZ, ami abból adódhat, hogy itt megjelenik a ferrit/bénit szövetelem is.
- A 2 impulzusos technológiánál a heglencsén belül egy áthőkezelt heglencse gyűrű is kialakult, ami jelentős részben megeresztett martenzitet tartalmazott, amiből a kisebb keménysége is adódik. Az UCHAZ szintén leginkább megeresztett martenzitet tartalmaz, míg az ICHAZ esetén megjelenik a ferrit/bénit szövetelem is. Az SCHAZ hasonlít a lágy munkarendűnél is látott SCHAZ-ra, és szintén főleg megeresztett martenzitet tartalmaz.

- A lágy munkarendű kötésnél a legnagyobb szemcseméret a heglencsében található és az UCHAZ tartalmazta a legfinomabb szemcséket. Az ICHAZ és SCHAZ szemcseméretei közel azonosak.
- A 2 impulzusos technológiánál a heglencse közepén finomszemcsés a szövetszerkezet, viszont az áthőkezelt zónában eldurvultak a szemcsék, ez is magyarázatot adhat a kisebb keménységre ebben az övezetben. Az ICHAZ és az SCHAZ szemcseméretei szintén megegyeznek; csak egy kicsivel nagyobbak, mint a lágy munkarenddel készült kötés azonos zónáiban lévőek.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton szeretnének köszönetet mondani Vahid Javaheri-nek és Henri Tervo-nak (*University of Oulu, Oulu, Finland*) a szövetszerkezeti vizsgálatokban nyújtott segítségükért.

Irodalom

- [1] M. Yunwu et al., "Fracture modeling of resistance spot welded ultra-high-strength steel considering the effect of liquid metal embrittlement crack," *Mater. Des.*, vol. 210, 110075, Nov. 2021, doi:10.1016/j.matdes.2021.110075.
- [2] M. Tamizi, M. Pouranvari and M. Movahedi, "Welding metallurgy of martensitic advanced high strength steels during resistance spot welding," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 22, pp. 327–335, Nov. 2016, doi: 10.1080/13621718.2016.1240979.
- [3] S. Mathi, A. Schiebahn, P. Bamberg and U. Reisgen, "Estimation of the Incidence of Liquid Metal Embrittlement Crack in 3rd Generation Advanced High Strength Steel During Resistance Spot Welding using 2D and 3D Weld Lobe Curve," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 11, pp. 345 – 354, Apr. 2022, doi: 10.17577/IJERTV11IS030149.
- [4] P. Kaha, M. Pirinen, R. Suoranta and J. Martikainen, "Welding of Ultra High Strength Steels," *Adv. Mater. Res.*, vol. 849, pp. 357-365, Nov. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.849.357.
- [5] L. Yunzhao, T. Huaping and L. Ruilin, "Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spot Welded Martensitic Advanced High Strength Steel," *Processes*, vol. 9, 1021, Jun. 2021, doi: 10.3390/pr9061021.
- [6] B. Varbai, C. Sommer, M. Szabó, T. Tóth and K. Májlinger, "Shear tension strength of resistant spot welded ultra high strength steels," *Thin-Walled Struct.*, vol. 142, pp. 64-73, Sept. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2019.04.051.
- [7] M. Bo-han, M. Dong-fang, W. Huan-ran, C. Da-nian and Z. Feng-hua, "Ballistic impact response of resistance-spot-welded (RSW) doublelayered plates for Q&P980 steel," *Def. Technol.*, vol. 18, pp. 1052-1064, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.dt.2021.04.010.
- [8] O. Siar, S. Dancette, T. Dupuy and D. Fabregue, "Impact of liquid metal embrittlement inner cracks on the mechanical behavior of 3rd generation advanced high strength steel spot welds," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 6678 – 6689, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.100.
- [9] J. Tian, W. Tao and S. Yang, "Investigation on microhardness and fatigue life in spot welding of quenching and partitioning 1180 steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 19, pp. 3145 - 3159, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.083.

- [10] W. Dong, M. Lei, H. Pan, K. Ding and Y. Gao, “Role of the internal oxidation layer in the liquid metal embrittlement during the resistance spot welding of the Zn-coated advanced high strength steel,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 21, pp. 3313 - 3326, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.154.
- [11] A.R.H. Midawi et al., “A novel technique to measure the local mechanical properties of third generation advanced high strength steel resistance spot welds,” *Forces Mech.*, vol. 9, 100150, 2022, doi: 10.1016/j.finmec.2022.100150.
- [12] M. Tamizi, M. Pouranvari and M. Movahedi, “The Role of HAZ Softening on Cross-Tension Mechanical Performance of Martensitic Advanced High Strength Steel Resistance Spot Welds,” *Metall. Mater. Trans.*, vol. 52, pp. 655–667, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11661-020-06104-5.
- [13] M. Pouranvari, S. Sobhani and F. Goodarzi, “Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced highstrength steel: Microstructure-properties relationship,” *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 867–874, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.01.009.
- [14] M. Stadler, M. Gruber, R. Schnitzer and C. Hofer, “Microstructural characterization of a double pulse resistance spot welded 1200 MPa TBF steel,” *Weld. World*, vol. 64, pp. 335–343, Dec. 2020, doi: 10.1007/s40194-019-00835-9.
- [15] S. M. Manladan, J. Yeojin and P. Yeong-Do, “Effect of paint baking on the halo ring and mechanical behavior of 30MnB5 hot-stamped steel resistance spot welding joints,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 4756 - 4761, May. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.144.
- [16] M. H. Amini-Chelak, R. Miresmaeili, M. Askari-Paykani, H. Aliyari and H. R. Shahverdi, “Resistance spot weldability of Fe66Cr16.5Ni14.1Si3.4 advanced high strength steel using D-optimal design of experiment method,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 25, pp. 5615 - 5632, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.06.262.
- [17] P. Eftekharimilani, E. M. van der Aa, M. J. M. Hermans and I. M. Richardson, “The microstructural evolution and elemental distribution of a 3rd generation 1 GPa advanced high strength steel during double pulse resistance spot welding,” *Weld. World*, vol. 61, pp. 691-701, Apr. 2017, doi: 10.1007/s40194-017-0459-4.
- [18] Á. Meilinger, L. Prém and S. Abd Al Al, “Comparion of RSW technologies on DP steels with modified instrumented Charpy impact test,” *Weld. World*, vol. 67, pp. 1911–1922, Apr. 2023, doi: 10.1007/s40194-023-01526-2.
- [19] K. Zhou and L. Cai, “Online nugget diameter control system for resistance spot welding,” *J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, pp. 2571–2588, Mar. 2013, doi: 10.1007/s00170-013-4886-0
- [20] A. Chabok, H. Cao, E. van der Aa and Y. Pei, “New insights into the fracture behavior of advanced high strength steel resistance spot welds,” *J. Mater. Process. Technol.* vol. 301, 117433, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117433.
- [21] Y. Zhang, C. Fu, R. Yi and J. Ju, “Optimization of Double-pulse Process in Resistance Spot Welding of Hot Stamped Steel Sheet,” *ISIJ Int.*, vol. 60, pp. 1284-1290, Nov. 2020, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-579.
- [22] L. Prém, Z. Bézi and A. Balogh, “Development of Resistant Spot Welding Technology for Automotive Ferrite-Martensitic Dual-Phase Steels with Joint Application of Finite Element

- Modelling and Experimental Research,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 1138, pp. 43-48, Jul. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.43.
- [23] S. Alden and Á. Meilinger, “Investigation of Resistance Spot Welded Joints Made on Ultra-high-Strength Steel Sheets,” *Lect. Notes Mech. Eng., VAE 2022*, pp. 981–994, Sept. 2022, doi: 10.1007/978-3-031-15211-5_82.
- [24] S. Dhara, S. M. C. van Bohemen and M. J. Santofimia, “Isothermal decomposition of austenite in presence of martensite in advanced high strength steels: A review,” *Mater. Today Commun.*, vol. 33, 104567, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104567.
- [25] Y.Li; D.S. Martín; J. Wang; C. Wang and W. Xu, “A review of the thermal stability of metastable austenite in steels: Martensite formation,” *J. Mater. Sci. Technol.* vol. 91, pp. 200–214, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2021.03.020.
- [26] S. Keeler, M. Kimchi and P. J. Mooney, “Advanced High-strength Steel Application Guidelines,” Ver. 6., *WorldAutoSteel*, May. 2017.
- [27] S.A. Abd Al Al and Á. Meilinger, “Ellenállás-ponthegeztési technológia fejlesztése ultranagyszilárdságú acélokhoz,” *Hegesztéstechnika*, XXXV. évf., 1, 2024, pp. 49-51.

ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTÉSI PARAMÉTEREK HATÁSA AZ ALUMÍNIUM - ACÉL VEGYES KÖTÉSEK TULAJDONSÁGAIRA

Fodorné Cserépi Mariann

Tanársegéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: mariann.cserepi@uni-miskolc.hu

Meilinger Ákos

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az üzemanyag-fogyasztás és a költségek csökkentése érdekében az autó karosszériák könnyűszerkezetes felépítése nagyon fontos szempont. Ez nagy szilárdságú acélok és alumíniumötvözetek felhasználásával érhető el a legoptimálisabban. A legújabb karosszériák vegyes kötések tartalmazzák, ezért szükséges a megbízható kötéstechnológia kialakítása. Számos kötéstechnológiát vizsgáltak már, amelyek egyike az ellenállás-ponthegesztés (RSW), amely jellemzően autó karosszériák elemeinek összekötésére szolgál, és alkalmazható alumínium/acél hibrid kötések esetében is. A hegesztés során rideg intermetallikus vegyület (IMC) képződik, amelynek a vastagsága és a fázisai alapvetően meghatározzák a kötés tulajdonságait. Ebben a cikkben a különböző paraméter-kombinációkkal készített 6082-T6 / DP600 kötések vizsgálatát végezzük, keresve az optimális hegesztési paramétereket. Keresztszakító vizsgálatok alapján meghatározzuk az IMC réteg hatását a mechanikai tulajdonságokra.

Kulcsszavak: hibrid kötés, 6082-T6 alumíniumötvözet, DP600 acél, ellenállás-ponthegesztés (RSW), intermetallikus vegyület (IMC)

Abstract

The lightweight construction of car bodies is a very important aspect to reduce fuel consumption and costs. This is best achieved by using high-strength steels and aluminium alloys. The latest car bodies incorporate mixed joints, which makes it necessary to develop reliable joining technology. A number of joining technologies have been investigated, one of which is resistance spot welding (RSW), typically used to join car body panels, and can also be used for aluminium/steel hybrid joints. During the welding process, a brittle intermetallic compound (IMC) is formed, the thickness and phases of which essentially determine the properties of the joint. In this paper, 6082-T6/DP600 joints prepared with different parameter combinations are investigated in search of optimal welding parameters. Cross-sectional studies are used to determine the effect of the IMC layer on the mechanical properties.

Keywords: hybrid joint, 6082-T6 aluminium alloy, DP600 steel, resistance spot welding (RSW), intermetallic compound (IMC)

1. Bevezetés

Napjainkban az alumínium/acél anyagpárosítás jellemzően az autóiparban fordul elő, karosszéria elemek esetében, ilyenek például az energiaelnyelő elemek. A szerkezeti elemek kapcsolatai mechanikus kötési módszerekkel vagy termikus kötési eljárásokkal készülnek. Szegecs kötések esetén a nyíró-szakító, illetve a keresztzakító vizsgálatok jó kötési szilárdságot mutatnak [1], [2], ám ehhez a kötéstípushoz szegecsket kell használni, ami megdrágítja az eljárást. Egyes esetekben az elemek összekapcsolásának módját ragasztással egészítik ki [3]. A ragasztással történő kötések viszonylag drága technológiák, a hegesztett kötés költségghatékonyabb módszer. Hegesztésnél alapvetően az ellenállás ponthegeztés (RSW) és az ultrahangos hegesztés (UW) alkalmazható ennél az anyagkombinációnál [4]–[6].

Egyes vizsgálatok [2], [7] rávilágítottak arra, hogy az RSW-t csak ritkán használják alumínium/acéllemez összekötéshez, mivel rideg intermetallikus vegyület (IMC) keletkezik a két anyag határfelületén. A megfelelő kötésminőség kialakításához hegesztés előtt a felületi oxidréteg eltávolítása szükséges az alumínium oldalon. Emellett a hegesztési feladat kihívást jelent az egymástól teljesen eltérő anyagtulajdonságok (olvadáspont, hővezető képesség, elektromos ellenállás, szilárdsági tulajdonságok) miatt is. A kötés szilárdsági tulajdonságai ugyan jobbak lehetnek eltávolított oxidréteg esetén, de a gyártás során végzett oxidmentesítést nem lehet elég hatékony és olcsó, ezért ebben a vizsgálatban a hegesztett kötések oxideltávolítás nélkül készültek. További problémát az IMC jelenléte okoz, mivel nagyon rideg tulajdonságokkal rendelkezik. A kötés tulajdonságait alapvetően az IMC vastagsága és a kialakult fázis típusa befolyásolja. A kutatók különböző megállapításokra jutottak az optimális IMC rétegvastagságot illetően. Meco és társai [8] beszámoltak arról, hogy a vékony, 10 μm -nél kisebb vastagságú IMC rétegnek nincs jelentős hatása a kötések mechanikai tulajdonságaira, de a vastagabb IMC réteg káros lehet. Ennek tisztázása érdekében szükséges a folyamat hőmérsékletének és időtartamának a lehető legalacsonyabb és legrövidebben tartása, mivel az IMC-k kialakulása atomi diffúziót igényel. Az IMC fázisok esetében számos kutatás létezik a jelentősebb fázisok és azok kötési tulajdonságokra gyakorolt hatásának azonosítására [8, 9]. Ezek alapján jobb tulajdonságok érhetők el, ha minimalizáljuk az alumíniumban gazdag rideg IMC-k képződését. Az IMC réteg morfológiája és vastagsága a folyamat paramétereitől és a kötés középpontjától való távolságtól függ, általában nagyobb a kötés középpontjában és kisebb a határon [9].

Ebben a cikkben azon hegesztési paraméter-kombinációkat keressük, amelyek esetében az IMC réteg jónak tekinthető, a vizsgált mechanikai tulajdonságok elfogatható eredményt adnak kereszt-szakító vizsgálatok esetén.

2. Alkalmazott alapanyagok

A kísérletekhez az autóiparban gyakran használt alapanyagokat választottunk ki. Az acél oldal DP 600 volt, amelyet 6082-T6 alumíniumötvözetrel kombináltunk. Mindkét alapanyag 1 mm vastagságú volt. A DP600 acélnek a kétfázisú (DP) acélok között viszonylag alacsony a szilárdsága. A DP acélok kemény martenzit szigeteket tartalmaznak ferrit mátrixba ágyazva, diszperz eloszlással. A 6082-T6 ötvözettypust jó korrózióállóság jellemzi, de a hegesztés során jelentős lágyulás léphet fel a hőhatásövezetben.

Az 1. és a 2. táblázatok az alapanyagok kémiai összetételét mutatják tömegszázalékban, a 3. táblázat pedig az alapanyagok minőségi tanúsítványok szerinti főbb mechanikai tulajdonságait (szakítószilárdság (R_m), folyáshatár ($R_{p0,2}$) és nyúlás (A_{50})) foglalja össze.

1. táblázat. Az alumínium alapanyag kémiai összetétele [tömeg%]

Alapanyag	Cu	Fe	Mn	Cr	Mg	Ti	Si	Zn
6082-T6	0,09	0,46	0,46	0,02	0,7	0,03	0,9	0,08

2. táblázat. Az acél alapanyag kémiai összetétele [tömeg%]

Alapanyag	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	B
DP600	0,098	0,2	0,81	0,015	0,002	0,014	0,010	0,0002

3. táblázat. A felhasznált alapanyagok legfontosabb mechanikai tulajdonságai

Alapanyag	R _m [MPa]	R _{n0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]
6082-T6	348	303	15
DP600	669	448	18,7

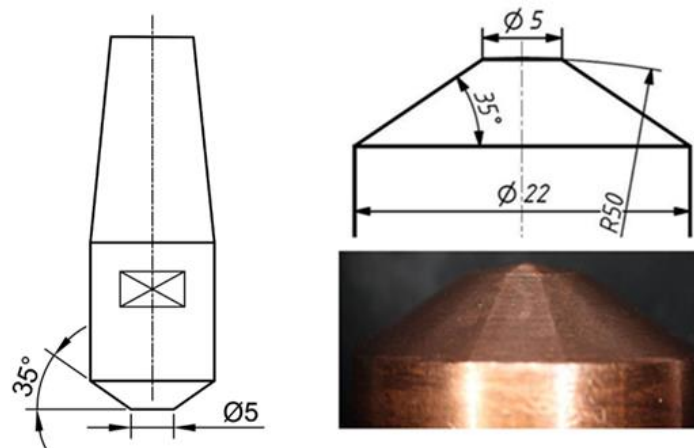
3. Hegesztési körülmények

A hegesztési paraméterek meghatározásához előzetes kísérleteket hajtottunk végre. Először meghatároztunk olyan IMC réteg szélső értékeket, amelyek még biztosították a kötések mechanikai igénybevétellel szembeni elvárt tulajdonságait. Ezt követően azokkal a paraméter-kombinációkkal dolgoztunk tovább, amelyek az előzetes vizsgálatok során megfelelőnek bizonyultak. Ez az előzetes vizsgálat az ékpróba volt. Ennek a vizsgálatnak a segítségével gyorsan meg lehet határozni a kötés minőségét, fő tönkremeneteli módját. A vizsgálat leírását az MSZ EN ISO 10447:2023 számú szabvány tartalmazza. A vizsgálat során a szabvány által rögzített geometriával rendelkező célszerszámmal roncsoljuk a kötésünket a heglencse síkjában. A vizsgálat során észlelet tönkremeneteli módok alapján ki választottuk azon paraméter kombinációkat, amelyekkel ezt követően további kísérleteket végeztünk a kötéskombinációk mechanikai tulajdonságainak mélyebb feltárása érdekében.

A próbatestek elkészítéséhez TECNA 8007 típusú ponthegeztő berendezést (AC, 50 Hz) használtunk, TE 550 típusú vezérléssel (1. ábra). A sajtoló nyomást pneumatikus henger biztosította.

**1. ábra.** TECNA 8007 típusú ponthegeztő berendezés (AC, 50 Hz), TE 550 típusú vezérléssel.

A használt elektróda anyaga a hegesztők elektródák osztályozására használt *Resistance Welding Manufacturers Association* (RWMA) rendszer szerint 2. osztályú CuCrZr volt. A hegesztő elektródák a 2. ábrán szemléltetett geometriai kialakításúak voltak, amelyet a hegesztendő lemez vastagságától függően kellett megválasztani. 1 mm-es lemezvastagságnál a lemezzel érintkező felület 5mm átmérőjű és 50 mm rádiuszú gömbfelület, a szakirodalom ajánlása szerint [10–11].



2. ábra. A hegesztéshez használt elektróda geometriája.

Az előzetes vizsgálatokhoz alkalmazott hegesztési paramétereket a 4. táblázat foglalja össze. Azon paraméter-kombinációk, amelyek nem hoztak létre további vizsgálatra alkalmas kötéseket, a táblázatban „Ø” jelzést kaptak, míg a „további vizsgálat” jelzésű kötéstípusokkal folytattuk a kísérleti munkát. A továbbiakban az itt szereplő minta sorszámokkal történik az egyes paraméter-kombinációk azonosítása.

4. táblázat. Az előzetes kísérletekhez használt hegesztési paraméterek

A minta sorszáma	Áramerősség I_h [kA]	Hegesztési idő t_h [per]	Sajtoló erő F_c [kN]	Alkalmasság további vizsgálatra
1	10	6	2,5	Ø
2	12			Ø
3	14			további vizsgálat
4	16			további vizsgálat
5	18			további vizsgálat
6	10	10		Ø
7	12			Ø
8	14			további vizsgálat
9	16			további vizsgálat
10	18			további vizsgálat
11	10	12		Ø
12	12			további vizsgálat
13	14			további vizsgálat
14	16			további vizsgálat
15	18			további vizsgálat

A minta sorszáma	Áramerősség I_h [kA]	Hegesztési idő t_h [per]	Sajtoló erő F_c [kN]	Alkalmasság további vizsgálatra
16	10	14	2,5	Ø
17	12			további vizsgálat
18	14			további vizsgálat
19	16			további vizsgálat
20	18			további vizsgálat
21	10	16		Ø
22	12			további vizsgálat
23	14			további vizsgálat
24	16			további vizsgálat
25	18			további vizsgálat
26	10	18		Ø
27	12			további vizsgálat
28	14			további vizsgálat
29	16			további vizsgálat
30	18			további vizsgálat

4. Vizsgálatok

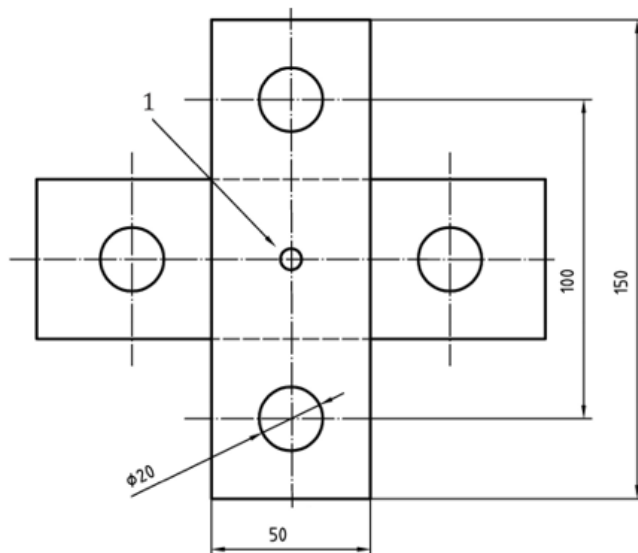
4.1. Keresztszakító vizsgálatok

A keresztszakító próbatestek mechanikai vizsgálata MTS típusú elektrohidraulikus univerzális anyagvizsgáló berendezéssel történt, amelyet a 3.ábra szemléltet. Ez a berendezés egy számítógéppel vezérelt, elektro-hidraulikus működtetésű, univerzális berendezés. [12]



3. ábra. MTS típusú elektrohidraulikus univerzális anyagvizsgáló berendezés [12]

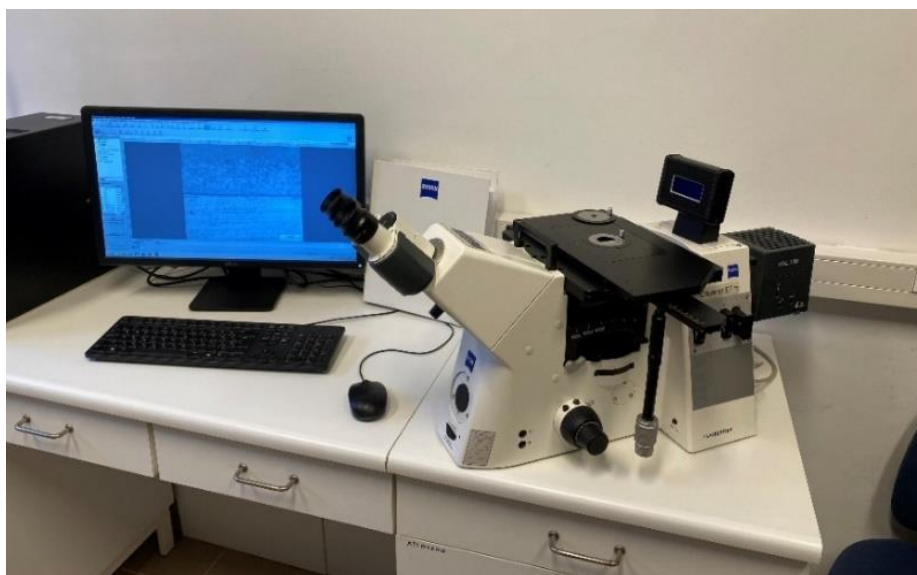
Keresztszakító vizsgálat során, az MSZ EN ISO 14272:2016 szabvány leírásai alapján, a két lemez 90°-ban el van fordítva egymáshoz képest. A kötés geometriai méreteit a 4. ábra mutatja. A keresztszakító vizsgálat elvégzéséhez, erre a célra készített befogót alkalmaztunk.



4. ábra. A keresztszakító vizsgálat során használt próbatest geometriai kialakítása.

4.2. Optikai mikroszkóppal végzett vizsgálatok

A mikroszkópi felvételek elkészítéséhez Zeiss Observer D1.M típusú invert optikai fénymikroszkópot alkalmaztunk (5. ábra).



5. ábra. Zeiss Observer D1.M típusú fénymikroszkóp és a segédberendezés.

A mikroszkópi felvételek elkészítéséhez a vizsgálandó darabokat két komponensű epoxi gyantába ágyztuk, majd (P120 – P1500) csiszolópapírok segítségével csiszoltuk. Ezt követően a polírozást gyémántpasztával végeztük. A maratáshoz Nital marószert (3% HNO_3 + 97% etanol) használtunk.

Mikrocsiszolatok segítségével megmértük a keletkezett IMC réteg vastagságát és az átmérőjét. Ezek közül a IMC átmérő értékének a meghatározása okozott nehézséget, mivel a rétegvastagság értékek és a kötésátmérő értékek jelentős, nagyságrendi eltérést mutatnak. Ennek a problémának a megoldására kifejlesztettünk egy eljárást, amelynek során kis méretű Vickers keménység lenyomatokkal jelöltük meg az IMC réteg kezdő- és végpontját, majd az erről készített mikrofelveleken mértük le a kötések átmérőjét.

4.3. A kötések vastagságának mérése

A vizsgálatok során feljegyeztük a hegesztett kötések vastagságát, amelyet a 6. ábrán látható mérőeszközzel mértünk meg. Minden kötés elkészítése után lemértük a kapott kötések vastagságát, majd ezt követően kerültek az egyes vizsgálati darabok a tervezett vizsgálatokra.



6. ábra. Rúgós mérőóra

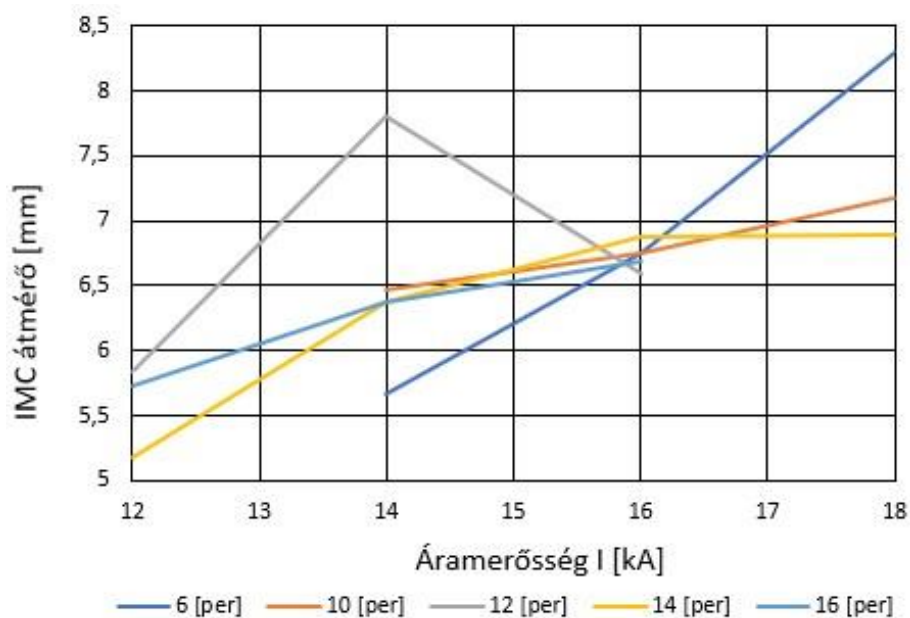
5. Vizsgálati eredmények

Az 5. táblázat tartalmazza a csiszolatokon történt IMC réteg átmérők ($\text{IMC}\emptyset$), IMC réteg vastagságok (h_{IMC}) mérési eredményeit, a próbatestek készítésekor mért kötésvastagság (h) értékeit, valamint a keresztzakító vizsgálat során mért maximális terhelő erő értékeket. Minden paraméter-kombinációhoz három próbatest készült, amely alapján határoztuk meg az átlagos maximális terhelőerőt (F_{CT}) és ennek az értéknek a szórását ($F_{\text{CT Szórás}}$).

A táblázatban található eredményekből jól látszik, hogy az áramerősség növekedésével az IMC réteg átmérője nő. Ezt az összefüggést szemlélteti az 7. ábra, amelyen követhető a növekedés tendenciája.

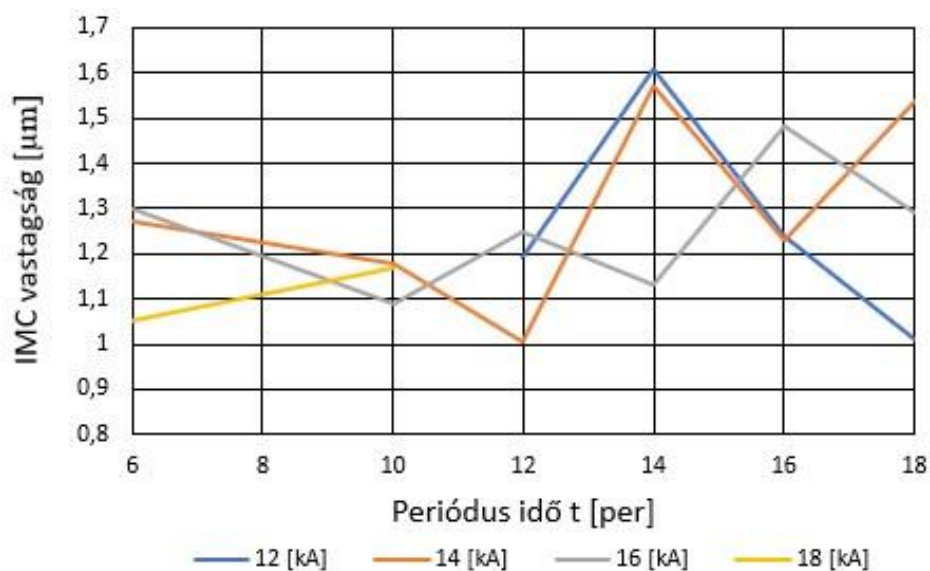
5. táblázat. A vizsgálatok eredményi ($IMC\emptyset$ = IMC réteg átmérő, h_{IMC} = IMC vastagság, h = kötésvastagság, F_{CT} = keresztcsakító próbák átlagos maximális értéke, F_{CT} szórás = F_{CT} értékek szórása)

Sor-szám	I [kA]	t [per]	F [kN]	IMC \emptyset [mm]	h_{IMC} [μ m]	h [mm]	F_{CT} [N]	F_{CT} Szórás [N]
3	14	6	2,5	5,666	1,27	1,6	228,85	60
4	16	6	2,5	6,759	1,3	1,4	448,23	70
5	18	6	2,5	8,292	1,05	1,4	317,26	120
8	14	10	2,5	6,469	1,18	1,6	394,1	66
9	16	10	2,5	7,093	1,09	1,5	421,86	54
10	18	10	2,5	7,172	1,17	1,3	–	–
12	12	12	2,5	5,849	1,19	1,78	224,06	52
13	14	12	2,5	7,801	1,007	1,66	286,53	49
14	16	12	2,5	6,603	1,25	1,5	413,6	25
17	12	14	2,5	5,189	1,61	1,8	311,3	107
18	14	14	2,5	6,382	1,57	1,66	393,2	107
19	16	14	2,5	6,885	1,13	1,52	283,96	70
22	12	16	2,5	5,732	1,24	1,77	187,7	17
23	14	16	2,5	6,382	1,23	1,66	300,95	37
24	16	16	2,5	6,681	1,48	1,57	268,86	130
27	12	18	2,5	6,269	1,01	1,83	135,5	71
28	14	18	2,5	6,898	1,54	1,7	259,63	78
29	16	18	2,5	6,435	1,29	1,57	310,83	26



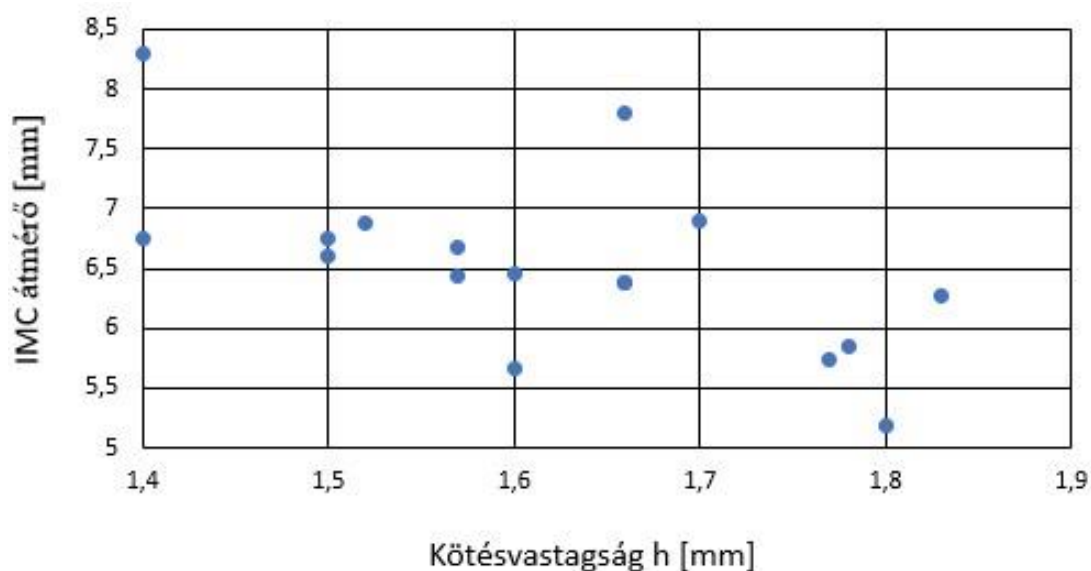
7. ábra. Az IMC réteg átmérő és az áramerősség kapcsolata.

A 8. ábrán az IMC rétegvastagság változása látható a periódus idő függvényében. A görbékből nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni a periódusidő és az IMC vastagság kapcsolatára. Az adatok vizsgálatából az is jól látszik, hogy az IMC rétegvastagság minden paraméter-kombinációban 1-1,6 μm között mozog, azaz kicsi különbségek adódtak a különböző paraméter-kombinációk között.



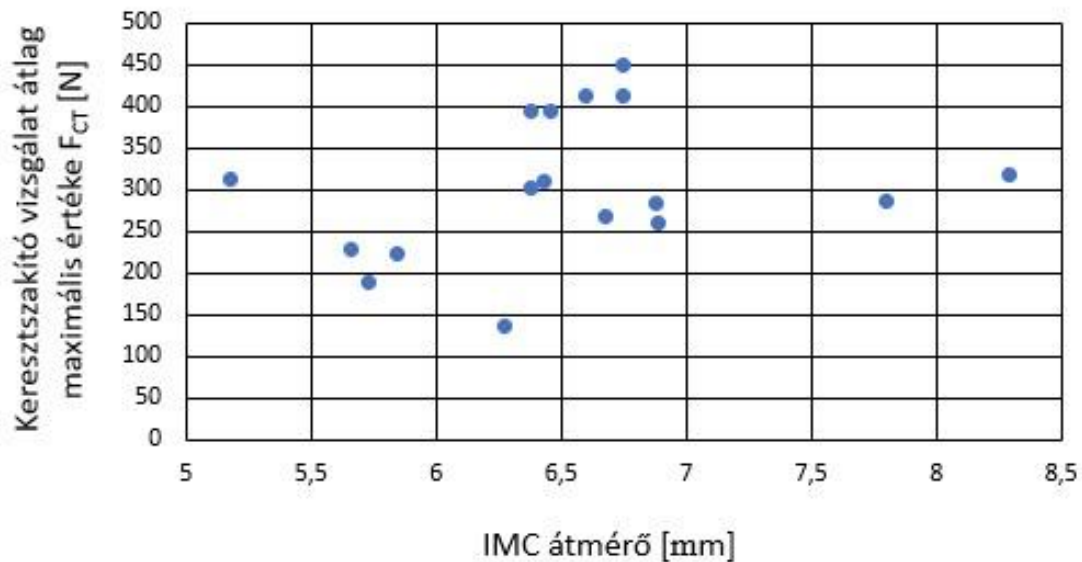
8. ábra. Az IMC rétegvastagság és a periódus idő kapcsolata.

A 9. ábra bemutatja az IMC átmérők és a kötésvastagságok közötti összefüggéseket. A diagramból látható, hogy az IMC átmérők növekedésével a kötésvastagságok csökkennek.



9. ábra. Az IMC átmérő és a kötésvastagság kapcsolata.

A 10. ábra az IMC átmérőket ábrázolja a keresztzakító vizsgálat eredményeinek a függvényében.



10. ábra. A maximális keresztzakító erő értéke és az IMC átmérők közötti kapcsolat.

A diagram alapján megállapítható, hogy a 6-7 mm IMC átmérőnél adódtak a legjobb eredmények. Az ettől nagyobb IMC átmérők esetén a keresztzakító erők visszaestek, aminek a magyarázata a 9. ábrán keresendő, ugyanis ezeknél a próbáknál volt a legkisebb a kötésvastagság, így a kevés maradék anyag szakadt el, nem pedig az IMC réteg nyíródott.

6. Összefoglalás

Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek összesítése és elemzése alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- Számos paraméter-kombinációval lehetséges értékelhető kötést készíteni 6082-T6 / DP600 anyagkombináció esetén, ellenállás-ponthegesztéssel.
- A vizsgálati eredmények szórása nagy, így a reprodukálhatóság kérdése kulcsfontosságú ezen technológiánál. Bizonyos paraméter-kombinációk kis szórást eredményeztek, így ezek további vizsgálata indokolt.
- Egyértelmű kapcsolat található az áramerősség és az IMC réteg átmérője között: az áramerősség növelésével az IMC réteg átmérője is nőtt.
- A periódusidő változása nem mutatott szignifikáns különbséget sem az IMC vastagság tekintetében, sem az IMC átmérő esetében.
- Az IMC rétegvastagság minden paraméterkombinációban 1-1,6 μm között változott.
- A különböző hegesztési paraméterek különböző mértékű benyomódást, így különböző kötésvastagságot eredményeztek. Összefüggés található a kötésvastagság és az IMC réteg átmérők között, kisebb kötésvastagságnál nagyobb IMC átmérő alakul ki.
- A legjobb keresztzakító erő értékeket a 6-7 mm IMC átmérő tartományban kaptuk. Az ettől nagyobb átmérőknél visszaesett az erő értéke, ami a kisebb kötésvastagsággal magyarázható.

Irodalom

- [1] N. Karathanasopoulos, and D. Mohr, “Strength and Failure of Self-Piercing Riveted Aluminum and Steel Sheet Joints: Multi-axial Experiments and Modeling”, *J. Adv. Join. Process.* 100107: 1 – 9, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jajp.2022.100107.
- [2] T. Sakiyama et al., “Dissimilar Metal Joining Technologies for Steel Sheet and Aluminum Alloy Sheet in Auto Body.” *Nippon Steel Technical Report* No. 103: 91 – 97, May. 2013, <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/103-14.pdf>
- [3] A. Guzanová et al., “Experimental Study of Steel–Aluminum Joints Made by RSW with Insert Element and Adhesive Bonding.” *Materials*, 16, 864., Jan. 2023, doi: 10.3390/ma16020864.
- [4] F. Haddadi,. “Microstructure reaction control of dissimilar automotive aluminium to galvanized steel sheets ultrasonic spot welding.” *Mater. Sci. Eng. A*, 678: 72–84, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.09.093.
- [5] D. Zhao, D. Ren, , K. Zhao, S. Pan, and X. Guo, “Effect of welding parameters on tensile strength of ultrasonic spot welded joints of aluminum to steel – By experimentation and artificial neural network.” *J. Manuf. Process*, 30: 63–74, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.08.009.
- [6] V.K. Patel, S.D. Bhole; and D.L. Chen, “Ultrasonic spot welding of aluminum to high-strength low-alloy steel: Microstructure, tensile and fatigue properties.” *Metall. Mater. Trans. A*, 45: 2055–2066, Nov. 2013, doi: 10.1007/s11661-013-2123-y.
- [7] A. Gullino, P. Matteis, and F. D’Aiuto, “Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications.” *Metals*, 9, 315; March. 2019, doi: 10.3390/met9030315.
- [8] S. Meco, G. Pardal, S. Ganguly, S. Williams, and N. McPherson, “Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components.” *Opt. Lasers Eng.*, 67: 22–30, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.optlaseng.2014.10.006.
- [9] W. Zixuan, W. Hui-Ping, C. Nannan, W. Min, and E.C. Blair “Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds.” *J. Mater. Process. Technol.*, 42: 12–23, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.11.017.
- [10] E. Z. Akbolatov, A. S. Kiselev, and M. S. Slobodyan, “ Prediction and stabilization of initial resistance between electrodes for small-scale resistance spot welding”, *Weld. World*, vol. 63, pp. 443–457, jan. 2019, doi: 10.1007/s40194-018-0671-x.
- [11] M. Gáspár, Á. Dobosy, M. Tisza, I. Török, Y. Dong, and K. Zheng, “Improving the properties of AA7075 resistance spot-welded joints by chemical oxide removal and post weld heat treating”, *Weld. World*, vol. 64, pp. 2119-2128, Sept. 2020, doi: 10.1007/s40194-020-00988-y.
- [12] W. Zhang, D. Sun, L. Han, W. Gao, and X. Qiu, “Characterization of intermetallic compounds in dissimilar material resistance spot welded joint of high strength steel and aluminum alloy.” *ISIJ Int.*, 51: 1870–1877, July. 2011, doi: 10.2355/isijinternational.51.1870.
- [13] M. Gáspár, H. Tervo, A. Kaijalainen, Á. Dobosy, and I. Török, “The Effect of Solution Annealing and Ageing During the RSW of 6082 Aluminium Alloy.” *Veh. Automot. Eng.*, 694–708, May. 2018, doi: 10.1007/978-3-319-75677-6_59.

MARTENZITES ÉS KETTŐS-FÁZISÚ ACÉLLEMEZEK ELLENÁLLÁS- PONTHEGESZTETT KÖTÉSEINEK NAGYCIKLUSÚ FÁRASZTÓVIZSGÁLATAI

Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad

*PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: sahm.alden@uni-miskolc.hu

Meilinger Ákos

*Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Gáspár Marcell

*Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: marcell.gaspar@uni-miskolc.hu

Lukács János

*Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az ellenállás-ponthegeztés az egyik leggyakrabban alkalmazott hegesztéstechnológia acéllemezek esetén, amelyet elsősorban autókarosszéria elemek kötéséhez használnak. A kettős-fázisú (DP) és a martenzites (MS) acélok rendkívül ígéretesek a járművek biztonsági zónáiban lévő erősítő elemekhez a nagy szilárdság és alakíthatóság egyedülálló kombinációja miatt. A járművek élettartama során általában ismétlődő igénybevétel lép fel, ezért a hegesztéstechnológia optimalizálását a hegesztett kötések fáradással szembeni ellenállására való tekintettel kell elvégezni. Kutatásunkban DP600, DP800, DP1000 és MS1200 acélok 1 mm vastag átlapolt kötéseit készítettük el impulzustechnológia alkalmazásával, TECNA 8007 berendezésen, abból a célból, hogy elemezzük a hegesztési áram, a hegesztési idő és az elektród erő kötéstulajdonságokra gyakorolt hatását statikus és ismétlődő terhelés alatt. Makroszkópikus, keménység és nyíró-szakító vizsgálatokat végeztünk az ellenállás-ponthegeztett kötések alapvető tulajdonságainak meghatározása céljából. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokat MTS 322 elektro-hidraulikus univerzális anyagvizsgáló rendszeren végeztük el. A vizsgálatok előkészítése és értékelése során statisztikai megközelítést alkalmaztunk, ami növelte azok megbízhatóságát. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok paramétereit a japán JSME S 002-1981 módszer figyelembevételével számítottuk ki.

Kulcsszavak: *nagyciklusú fáradás, martenzites acél, ellenállás-ponthegeztés, hegesztési paraméterek, kettős-fázisú acél, autóipar*

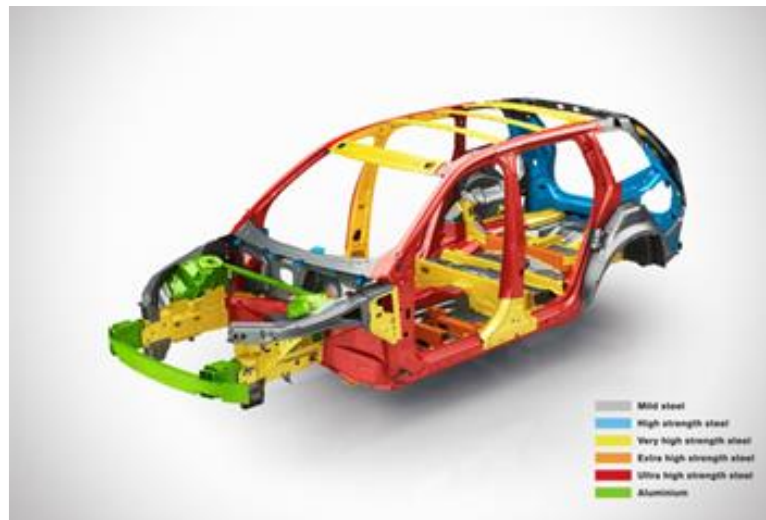
Abstract

Resistance spot welding (RSW) is one of the most common welding methods for steel sheets, as it is mainly used to join the automotive body structure parts. Dual-phase (DP) and martensitic (MS) steels are highly promising for structural reinforcement components in vehicle safety cages due to the unique combination of high strength and formability. During the lifetime of the vehicle, cyclic loading generally occurs, therefore the optimization of welding technology should be performed considering the fatigue resistance of the welded joints. In our research 1 mm thick standardized lap shear joint of DP600, DP800, DP1000 and MS1200 steels were welded by a TECNA 8007 RSW welder with extended pulse welding parameter technique to analyze the effect of welding time combined with current and electrode force on joint properties under static and cyclic loading. Macroscopic, hardness, and tensile-shear tests were carried out to determine the fundamental mechanical characteristics of the RSW joints. The high cycle fatigue (HCF) tests were performed on an MTS 322 universal electro-hydraulic materials testing system. A statistical approach was applied during the preparation and evaluation of the investigations, which increased their reliability. The parameters of the HCF experiments were calculated considering the Japanese testing method (JSME S 002-1981).

Keywords: high cycle fatigue (HCF); martensitic steel; resistance spot welding (RSW); welding parameters; dual-phase steel; automotive industry

1. Bevezetés

A megnövekedett üzemanyagárak és a környezetszennyezési szempontok miatt az autóipar intenzíven dolgozik azon, hogy megbízható módszereket alkalmazzon a járművek sajáttömegének csökkentésére. Az egyik fejlesztési irány az acél szilárdságának növelése a lemezvastagság csökkentése érdekében. A korszerű nagyszilárdságú acélokkal jelentős sajáttömeg-csökkenést lehet elérni [1]. Az 1. ábra a Volvo XC90 karosszériájának szerkezetében használt különböző szilárdságú acélokat szemlélteti példaként.



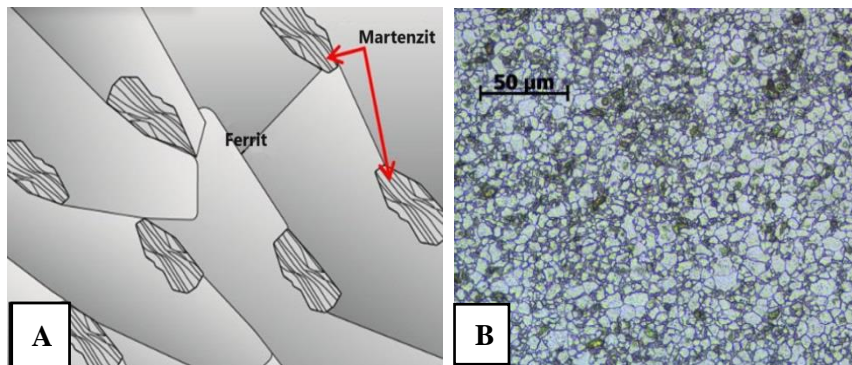
1. ábra. A Volvo XC90 karosszériája különböző szilárdságú acélokból [2].

A karosszériaelemek összekötéséhez szükséges hegesztett kötések nagy száma miatt, ami 3000-7000 ponthegesztést jelent egy átlagos autóban [3], az ellenállás-ponthegesztést széles körben

alkalmazzák, a nagy termelékenysége, a kötések mechanikai teherviselőképessége, valamint a tisztasága miatt [4]. A ponthegeesztett kötések tartóssága kritikus fontosságú az acéllemezek összekapcsolásánál, mivel a fáradásból eredő hibák gyakran az autókarosszéria ponthegeztési kötéseiből indulnak ki [1]. Az üzemeltetés során a jármű összetett, ismétlődő igénybevételnek van kitéve, amelyből eredően a járműszerkezet ponthegeztett kötéseinek sérülékenyek lehetnek a repedésekkel vagy meghibásodásokkal szemben. Ezért a fáradással összefüggésben a ponthegeztés minősége nagyon fontos a jármű integritásának és tartósságának biztosítása érdekében [5]. Az ellenállás-ponthegeztett kötések fáradással szembeni ellenállását és megbízhatóságát nem lehet figyelmen kívül hagyni. A jármű karosszériájának megbízhatósága szempontjából ezért számos vizsgálatot végeztek a ponthegeztett kötések fáradási tulajdonságainak értékelésére és előrejelzésére [6]. A fáradással szembeni ellenállás ismerete hozzájárul a ponthegeztett kötések mechanikai tulajdonságainak komplex megértéséhez [5]. A kettős-fázisú (*dual phase: DP*) és a martenzites (*martensitic: MS*) acélok ponthegeztett kötéseinek nagyciklusú fárasztóvizsgálatai hasznos információkkal szolgálhat mind a kutatók, mind pedig az ipari szakemberek részére.

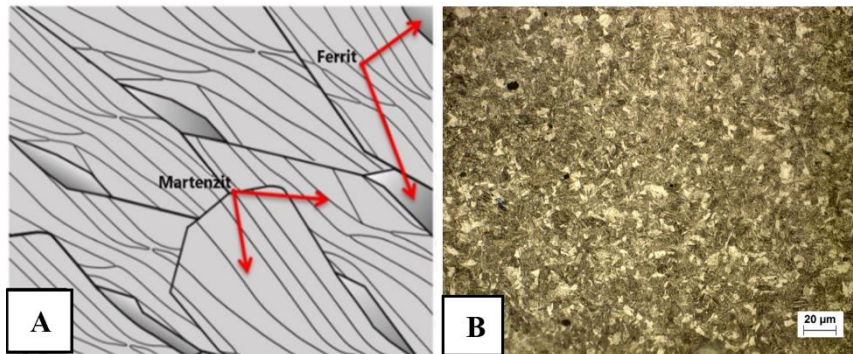
A JSME S 002-1981 előírás, amelyet a Japán Gépészmérnökök Társasága (*Japanese Society of Mechanical Engineers*) dolgozott ki, egy csökkentett próbatestszámot igénylő módszertant tartalmaz az acélok fárasztóvizsgálatainak elvégzésére, különös tekintettel a nagyciklusú fáradásra [7]. Elsősorban azokban az iparágakban használatos, ahol a nagyciklusú fáradás jellemző, például az autóiparban és a repülőgépiparban [8]–[9].

A DP acél rendszerint kemény martenzit szigeteket tartalmazó, nagy alakváltozó képességű ferritmátrixból áll. A nagy szilárdság és a más, hasonló szilárdsági kategóriájú acélokhoz képest nagy alakváltozó képesség miatt a DP acélokat széles körben használják az autóiparban [10]. A 2. ábra a DP acél mikroszerkezetét mutatja.



2. ábra. A: A DP acél mikroszerkezetének sematikus ábrázolása [11], B: A Docol DP600 mikroszerkezete (fekete: martenzit, világos: ferrit) [12].

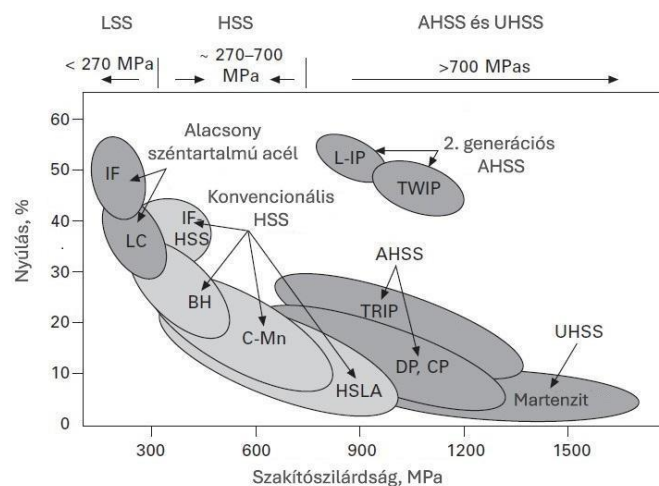
A martenzites acélok egészen 1700 MPa szilárdsági kategóriáig terjednek, viszonylag csekély fajlagos nyúlás mellett. A szövetszerkezetben a ferrit kisebb, míg az edzés eredményeként létrejött martenzit nagyobb arányban vesz részt [13]. A 3. ábra a martenzites acél mikroszerkezetét mutatja.



3. ábra. A: A martenzites acél szövetszerkezetének sematikus ábrázolása, B: az MS 1200 acél szövetszerkezete (fekete: martenzit, világos: ferrit)[14].

A nyíró-szakító erő és a tönkremeneteli mód ismerete nagyon fontos a ponthegesztett kötések mechanikai teljesítményének értékeléséhez, továbbá az azonos hegesztési körülmények között vizsgált minták esetében előzetes információt nyújt a nagyciklusú fáradással szembeni ellenállásról. Gyakran a ponthegesztett kötések rideg viselkedésére utaló elnyíródás és a kis nyíró-szakító erők miatt nem is szoktak fárasztóvizsgálatokat végezni. A kigombolódással járó tönkremeneteli mód rendszerint a kötések nagy teherviselő-képességét és ütéssel szembeni ellenállását jelzi, mivel ilyen esetben a pontkötések képlékeny alakváltozás során képesek átadni a mechanikai feszültségeket a környező alkatrészeknek [15].

A 4. ábrán látható, hogy az MS acélok nagyobb szilárdságúak ugyanakkor kisebb nyúlásúak, mint a DP acélok, ezért a járműipari felhasználási oldalról nézve szükséges egy összehasonlító elemzés az elfogadható nyíró-szakítóerőt eredményező technológiával készült DP és MS acél ponthegesztett kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásáról. A ponthegesztett kötések fáradással szembeni ellenállását alapvetően nagyciklusú fárasztóvizsgálatokkal szokták jellemezni, és a terhelés-ciklusszám ismeretében határozzák meg a fáradással szembeni ellenállást. A jelen tanulmányban bemutatott nagyciklusú fárasztóvizsgálatok elvégzése előtt makrovizsgálattal, nyíró-szakító vizsgálatokkal és a tönkremeneteli módok meghatározásával elemezzük a ponthegesztett kötések tulajdonságait.



4. ábra. Autóipari acéllemezek [16].

2. Kísérleti körülmények

2.1. Alapanyagok tulajdonságai

Az ellenállás-ponthegesztési kísérletekhez 1 mm vastagságú, Docol DP600, DP800, DP1000 és MS1200 acéllemezeket használtunk. A lemezek vegyi összetételét és mechanikai tulajdonságait az 1. és a 2. táblázatok tartalmazzák. A ponthegesztési kísérleteket TECNA 8007 (50/60 Hz, 80 kVA, egyfázisú AC) típusú, TE550 vezérlőegységgel ellátott ellenálláshegesztő gépen végeztük el.

1. táblázat. Az alapanyagok vegyi összetétele gyártói műbizonylat szerint [tömeg%]

Anyagminőség	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	B
DP600	0,098	0,200	0,810	0,015	0,002	0,030	0,040	0,0002
DP800	0,136	0,200	1,550	0,013	0,003	0,030	0,040	0,0003
DP1000	0,132	0,190	1,500	0,010	0,003	0,030	0,030	0,0002
MS1200	0,105	0,200	1,590	0,011	0,003	0,030	0,030	0,0022

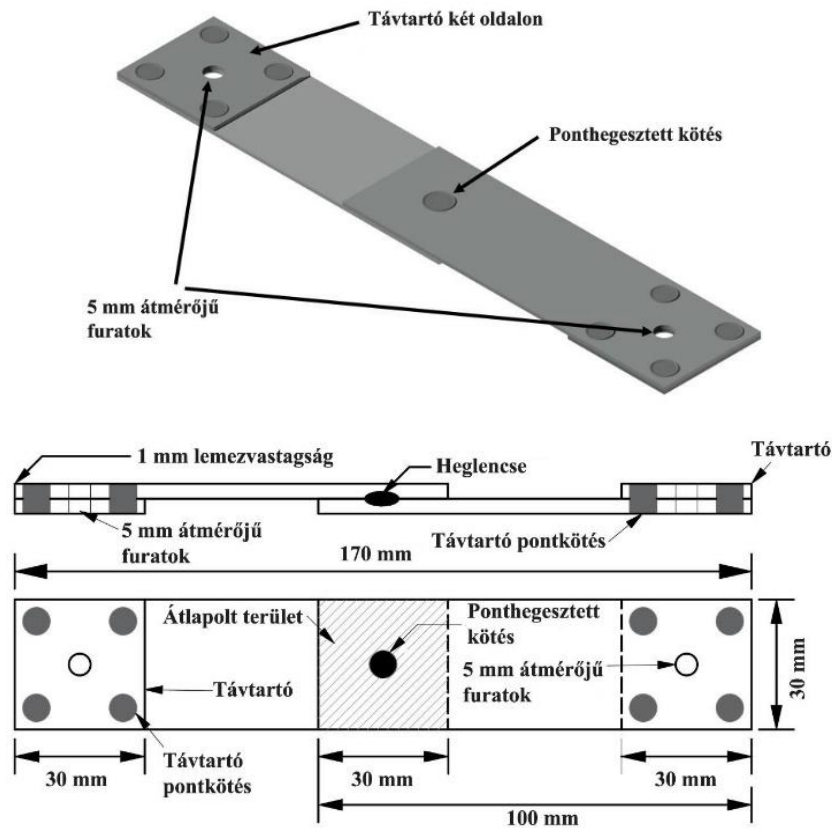
2. táblázat. A vizsgált acéllemezek mechanikai tulajdonságai

Anyagminőség	Folyáshatár $R_{p0,2}$ [MPa]	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Nyúlás A_8 [%]	Keménység HV10
DP600	448	669	18,7	204
DP800	585	871	15,5	270
DP1000	821	1074	9,5	329
MS1200	1108	1289	4,5	386

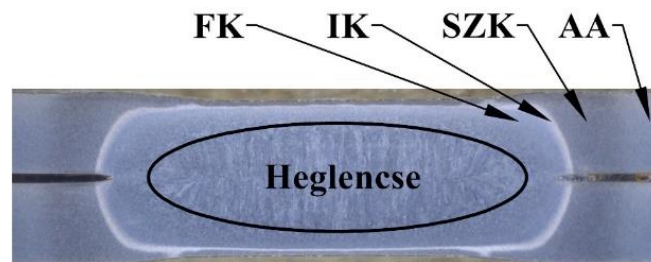
Egyciklusú, lágy munkarendet alkalmaztunk a hibamentes heglencsék elkészítéséhez. Az 5 mm végátmérőjű CuCrZr elektródokhoz 5 kN összeszorító erőt alkalmaztunk. Az áramerősség 8,5 kA, a hegesztési idő 16 periódus (320 ms) volt.

A nyíró-szakító és a nagyciklusú fárasztóvizsgálatokhoz átlapolt kötéseket készítettünk. Az alapanyagból két távtartó lemezt hegesztettünk a próbatetek befogóval érintkező részeihez, hogy kiküszöböljük a lemez átfedéséből adódó eltéréseket. A próbatetek megfelelő pozicionálása és megfogása érdekében két furatot készítettünk a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok elvégzéséhez. Az 5. ábra bemutatja a próbatetek geometriáját és méreteit. Az ellenállás-ponthegesztő géppel mindegyik acélkategóriából 20 kötést készítettünk a vizsgálatok elvégzéséhez.

A szilárdsági kategória fáradási tulajdonságokra gyakorolt hatásának elemzése érdekében mindegyik alapanyag hegesztett kötésén nyíró-szakító vizsgálatot, makrovizsgálatot és keménységvizsgálatot végeztünk. A ponthegesztett kötéseket középen kettévágtuk, csiszoltuk, políroztuk és marattuk a makroszkópi és a keménységvizsgálatok elvégzéséhez. Mitutoyo MVK-H1 keménységmérő berendezéssel Vickers (HV 0,2) mikrokeménység méréseket végeztünk a heglencse mentén, beleértve a hőhatásövezetet és az alapanyagot is, hogy megvizsgáljuk a hevítésből és gyors lehűtésből adódó keményedést és lágyulást. A makrovizsgálatok során eltérést nem tapasztaltunk. A 6. ábrán látható módon az alapanyag (AA) és a heglencse között három hőhatásövezeti alzónát azonosítottunk: az interkritikus (IK), a szubkritikus (SZK) és a felső kritikus (FK) övezetet.



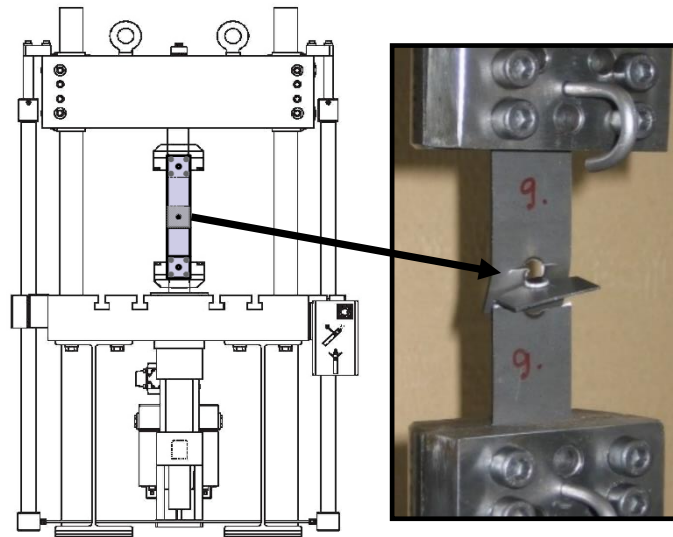
5. ábra. Próbatest geometria: 3D nézet (felső kép) és 2D felületi nézet (alsó kép).



6. ábra. Makrovizsgálat, Nital (2% HNO_3) maratás.

Az MTS 322 elektro-hidraulikus univerzális anyagvizsgáló gépen mindegyik anyagminőséghez 0,2 mm/s terhelési sebességet állítottunk be a nyíró-szakító vizsgálatoknál. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokat ugyanezen az MTS 322 elektro-hidraulikus univerzális anyagvizsgáló gépen végeztük el. Az MTS FlexTest 40 vezérlőn szinuszos ciklikus terhelést állítottunk be $R=0,1$ terhelés aszimmetria tényezővel, F_{\min}/F_{\max} terhelési aránynál, $f = 30$ Hz frekvenciával. A nagyciklusú vizsgálatok során több terhelési szintet alkalmaztunk. A vizsgálatok tervezése során a Japán Gépészmérnöki Társaság által kidolgozott JSME S 002-1981 [7] előírást vettük alapul. Az előírás a vizsgálat és az értékelés elemeit az élettartam és a kifaradási határ szakaszra különböző módon, de egymással összhangban határozza meg. A módszert többen sikeresen alkalmazták nagyszilárdságú acélok és hegesztett kötéseik

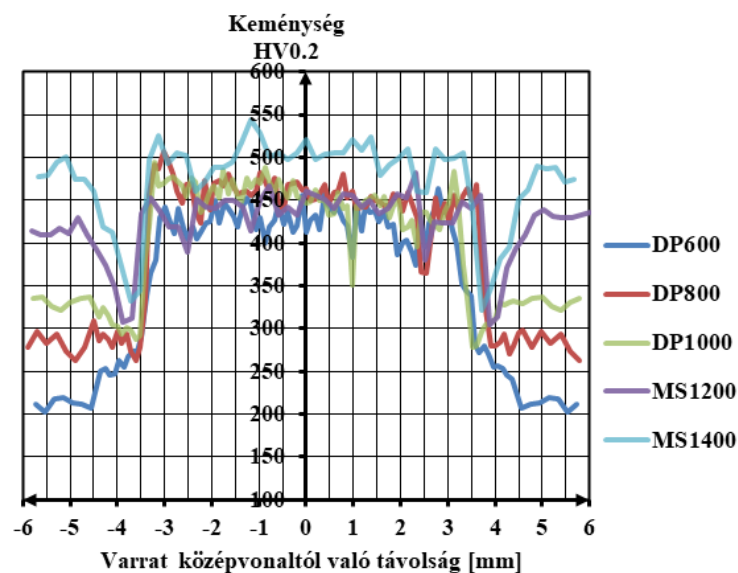
fárasztóvizsgálataihoz [17]-[18]. A vizsgált minták ciklusszámát tekintve elhanyagolható eltérés volt megfigyelhető a távtartó hiánya esetén a minta geometriájában. Ezért ez a cikk a továbbiakban nem tér ki a minta geometriájának hatására. A 7. ábra az univerzális anyagvizsgáló rendszer sematikus ábrázolását, valamint a befogóba rögzített próbatestet mutatja a fárasztóvizsgálat során.



7. ábra. Az MTS 322 anyagvizsgáló rendszer sematikus ábrázolása (bal oldali kép) és a befogóban eltört próbatestet (jobb oldali kép).

3. Anyagvizsgálati eredmények és értékelésük

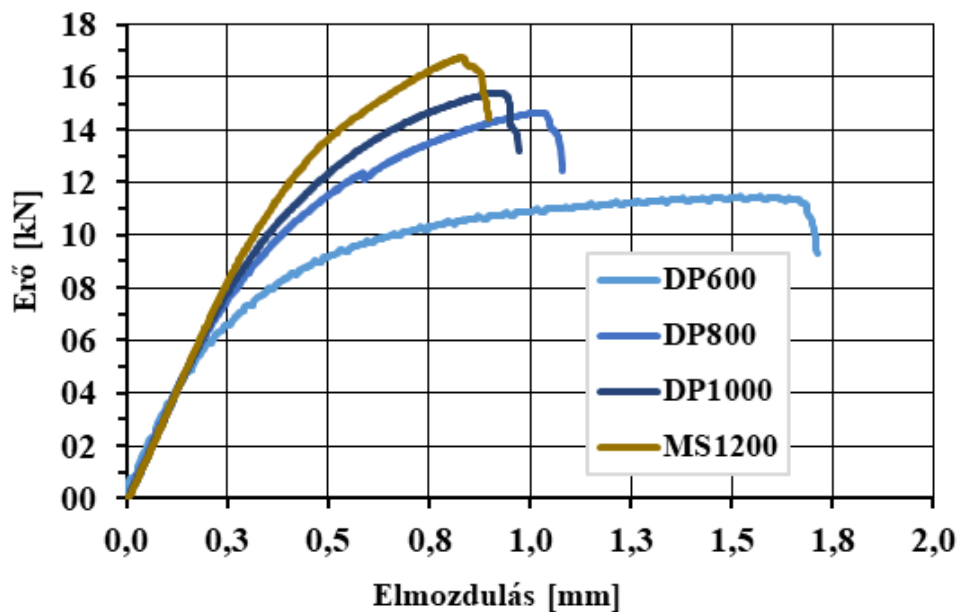
A 8. ábra a mikrokeménység eloszlásokat mutatja az összes vizsgált anyagminőségre.



8. ábra. A ponthegesztett kötések keménységeloszlása.

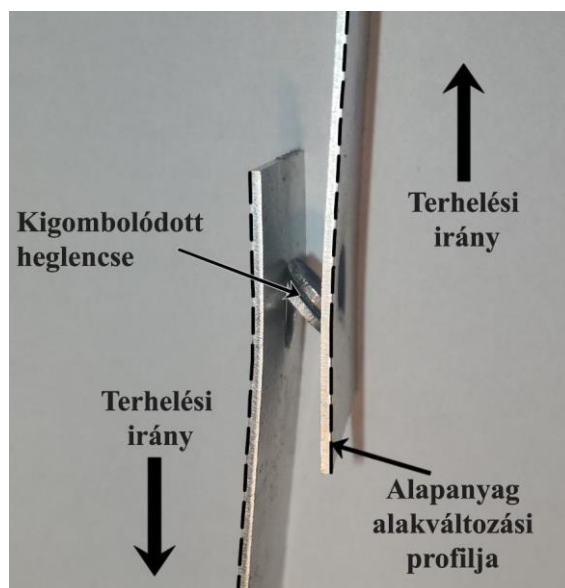
A ponthegesztett kötésekben elvégzett keménységmérések eredményei csökkenő tendenciát mutattak a legnagyobb keménységet mutató MS1200 acéltól a legkisebbet mutató DP600 lemezig. A heglencsék esetében mért keményedési arány (heglencse keménysége az alapanyaghoz képest) viszont ellentétes tendenciát mutatott, a legkisebb az MS1200 esetében, a legnagyobb pedig a DP600-nál volt. A DP1000 hőhatásövezetében minimális kilágyulás történt, miközben a DP600 és a DP800 esetében nem mértünk keménység csökkenést. A martenzites acélokban viszont jelentős keménységcsökkenés ment végbe a hőhatásövezet interkritikus és szubkritikus zónáiban, összhangban a szakirodalommal [19].

A 9. ábra az erő-elmozdulás görbéket mutatja - amelyből a pontkötések szilárdságára és alakváltozókéességére lehet következtetni - az elvégzett nyíró-szakító vizsgálatokhoz kapcsolódóan. A nyíró-szakító vizsgálatoknál a maximális erő a szilárdsági kategóriával összhangban DP600-ról MS1200-ra nő, tükrözve az alapanyagok növekvő szakítószilárdságát. A DP600 esetében mértük a legnagyobb elmozdulást, míg az MS1200 acél mutatta a legkisebb elmozdulást. Ez a DP600 acél nagyobb alakváltozókéességét jelzi. Az erő-elmozdulás görbék mellett nagyon fontos a tönkremeneteli módok ismerete, mivel azok információkat adnak a ponthegesztett kötés olyan fontos tulajdonságairól, mint például az alakíthatóság és az energiaelnyelő képesség.



9. ábra. Erő-elmozdulás görbék a nyíró-szakító vizsgálatok során.

A megfigyelt tönkremeneteli mód minden acélminőségnél kigömbölyedés volt. Mindegyik esetben szembeutó volt az alapfém alakváltozása. Az alakváltozás ugyanazt a mintát követte, mint az elmozdulás, a legnagyobb nyúlás DP600-nál fordult elő, és fokozatosan csökkent az MS1200 esetében tapasztalt legkisebb alakváltozásig. A 10. ábra az MS1200 minták tönkremenetelét és alakváltozását mutatja be példaként. A 3. táblázat a ponthegesztett kötések nyíró-szakító vizsgálati és keménységvizsgálati eredményeit mutatja.



10. ábra. Tönkremeneteli mód a nyíró-szakító vizsgálat során, MS1200 acél esetén.

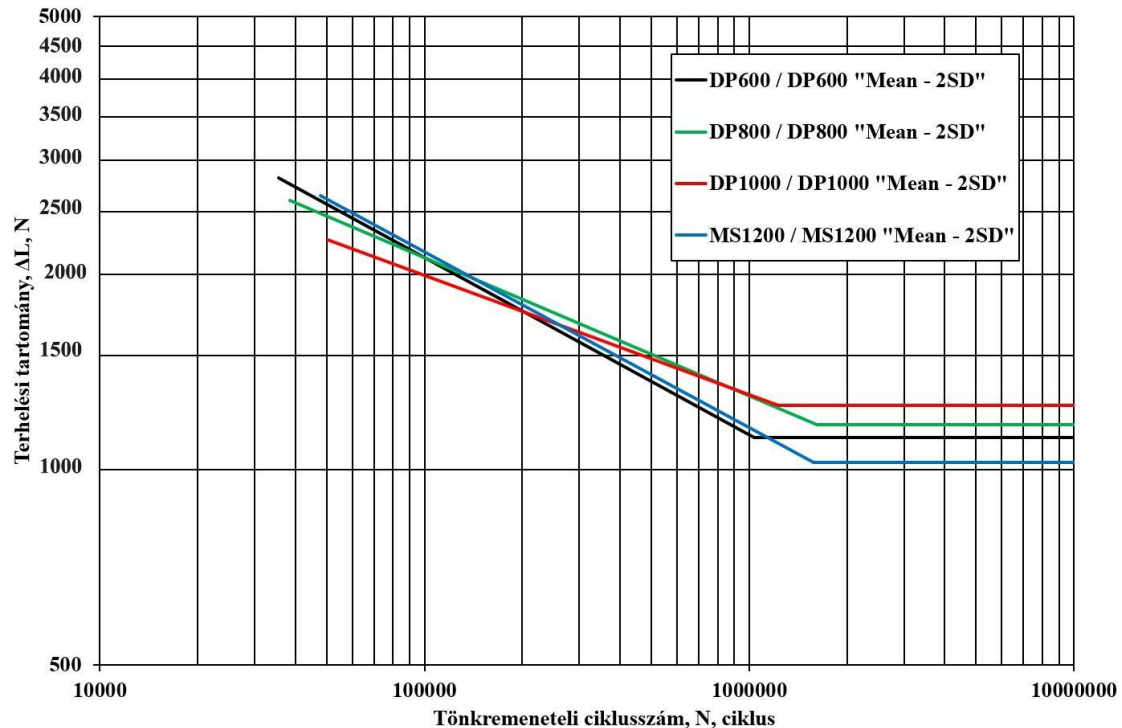
3. táblázat. Keménységvizsgálati és nyíró-szakító vizsgálati eredmények

Anyag-minőség	Heglecse átmérő [mm]	Alapanyag keménység HV0,2	Kilágyulás HV0,2	Heglecse keménység HV0,2	Maximális erő [kN]	Elmozdulás [mm]
DP600	6,8	210	N/A	428	11,46	1,53
DP800	6,9	280	N/A	449	14,65	1,02
DP1000	6,8	330	287	451	15,40	0,90
MS1200	6,9	414	306	453	16,76	0,83

A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményeit (terhelés-ciklusszám görbék) a 11. ábra mutatja logaritmikus skálában. A vizsgálatok során meghatározott határgörbékéből a műszakilag szükséges biztonság figyelembevételével úgy kapunk fáradásra érvényes tervezési görbéket, hogy a határgörbét két szórás („2SD”) tartománnyal lefelé toljuk („Mean – 2SD”). A 11. ábra ezeket az eltolt tervezési görbéket tartalmazza. A görbék csökkenő tendenciát mutatnak, ami azt jelzi, hogy a terhelési tartomány csökkenésével a tönkremenetelhez tartozó ciklusok száma nő, illetve, hogy a nagyobb terhelés gyorsabb tönkremenetelhez vezet. A kifáradási határ (100 000 ciklus) alatti terhelési szint esetén a vizsgált acélokból készült pontkötések elméletileg végtelen ciklusszámot elviselnek. A kettős-fázisú acélok esetében a kifáradási határhoz tartozó terhelés a szilárdsági kategóriával (DP600 < DP800 < DP1000) növekszik. A nagy szilárdság ellenére a vizsgált MS1200 martenzites acél ponthegeesztett kötésének a legkisebb a fáradással szembeni ellenállása. Ebből következően a martenzites acél ponthegeesztett kötése kevésbé alkalmasak ismétlődő igénybevételnek kitett alkatrészekhez. Alkalmazásuk elsősorban nagy statikus szilárdságot igénylő szerkezeti elemeknél előnyös.

A nyíró-szakító vizsgálatok és a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei között csak korlátozottan állíthatók fel összefüggések. Amint az a 9. ábrán látható, az MS1200 acél nyíró-szakító

vizsgálata során az elmozdulás kisebb, mint a DP-acélok esetében, és ezzel összefüggésben a fáradással szembeni ellenállás is ennél az acélnál a legkisebb. A DP1000 acél esetén a legnagyobb a kifáradási határ, miközben ezen acél ponthegesztett kötésének volt a legkisebb elmozdulása a DP acélok közül. A 3. táblázat tartalmazza a ponthegesztett kötések alapvető mechanikai vizsgálataink eredményeit, de nem találtunk egyértelmű összefüggést a fáradással szembeni ellenállás és az egyéb mechanikai tulajdonságok között.



11. ábra. A nagyciklusú fáradtvizsgálatok eredményei.

4. Összefoglalás

A tanulmányban ismertetett kutatás az autóiparban egyre gyakrabban használt kétfázisú (DP600, DP800, DP1000), valamint a martenzites (MS1200) acélokból készült ellenállás-ponthegesztett kötések nagyciklusú fáradással szembeni ellenállását vizsgálta. A kutatómunka annak meghatározására irányult, hogy a szilárdsági kategória és az acél típusa hogyan befolyásolja a pontkötések mechanikai és fáradási tulajdonságait. A főbb eredményeket a következőkben foglaljuk össze:

- A kidolgozott hegesztéstechnológiával (lágymunkarend) sikerült jó minőségű, hibamentes ponthegesztett kötéseket készíteni, amelyek kigombolódtak a nyíró-szakító vizsgálatok során.
- A nyíró-szakító vizsgálatok során mért maximális erő a szilárdsági kategóriával összefüggésben növekedett (11,46–16,76 kN). Hasonló tendencia volt megfigyelhető a heglencse keménységében, amely 428–453 HV_{0,2} között változott.
- A Japán Gépészmérnöki Társaság által kidolgozott JSME S 002-1981 előírás alapján reális időkeretek között sikerült nagyciklusú fáradásra érvényes tervezési görbéket meghatározni.

- Összességében a DP acélok pontkötései nagyobb ellenállást mutattak a nagyciklusú fáradással szemben, mint az MS1200 acél.
- A DP acélok esetében a kifáradási határhoz tartozó terhelési szint a szilárdsággal növekedett.

Irodalom

- [1] J J F. Bonnen *et al.*, „Fatigue of advanced high strength steel spot-welds,” *SAE Trans*, pp. 726-744, 2006, doi: 10.4271/2006-01-0978.
- [2] „Volvo XC90 body structure,” Accessed: 2024.12.02. [Online] Available: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/photos/148215/volvo-xc90-body-structure>
- [3] R. Maev *et al.*, „Real-time ultrasonic system for resistance spot weld inspection,” *Jour of NDT*, vol. 17, no. 9, pp. 18–21, 2012.
- [4] D. M. Junqueira *et al.*, „Analysis of spot weld distribution in a weldment—numerical simulation and topology optimization,” *Int J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, pp. 4071–4079, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1555-8.
- [5] T. K. Pal and K. Chattopadhyay, „Resistance spot weldability and high cycle fatigue behaviour of martensitic (M190) steel sheet,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 34, no. 1, pp. 46–52, 2011, doi: 10.1111/j.1460-2695.2010.01489.x.
- [6] T. Fujii *et al.*, „Fatigue properties of spot-welded and spot-weld-bonded joints of steel sheet,” *Procedia Eng*, vol. 10, pp. 1075–1080, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.177.
- [7] H. Nakazawa and S. Kodama, „Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves,” *Statistical research on fatigue and fracture. Current Japanese materials research*, Vol. 2. Eds.: T. Tanaka, S. Nishijima, M. Ichikawa, Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan, pp. 59-69, 1987, ISBN 1-85166-092-5.
- [8] L. Brasileiro *et al.*, „Experimental study of a CoCrMo alloy treated by SMAT under rotating bending fatigue,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 38, pp. 283–291, 2022.
- [9] Y. L. Lee and J. Pan, *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*, vol. 106. USA: Elsevier, 2005.
- [10] M. Tisza, „Three generations of advanced high strength steels in the automotive industry,” *Lect Not in Mech Eng, Vehicle and Automotive Engineering* 3, pp. 81-94, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-9529-5_7.
- [11] World auto steel Homepage, „AHSS Application Guideline,” Accessed: 2024.11.14. [Online] Available: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>
- [12] G. Béres and Z. Weltsch, „Estimation of strength properties from microhardness results in dual phase steels with different martensite volume fraction,” *Period. Polytech. Transp. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 206–212, 2019, doi: 10.3311/PPtr.12113.
- [13] M Kekik *et al.*, „Microstructural evaluation and influence of welding parameters on electrode plunge depth in resistance spot welded dissimilar DP800HF/1200M steel joints,” *Acad. Platform J. Eng. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 284-291, 2021, doi: 10.21541/apjes.859623.
- [14] WorldAutoSteel: Home, Accessed: 2024.11.14. [Online] Available: <https://ahssinsights.org/tag/microstructure/>
- [15] N. Den Uijl *et al.*, „Performance of resistance spot-welded joints in advanced high-strength steel in static and dynamic tensile tests,” *Weld. World*, vol. 56, pp. 51-63, 2012, doi: 10.1007/BF03321365.

- [16] C. D. Horvath, "Advanced steels for lightweight automotive structures," in *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, pp. 39–95, Woodhead Publishing, 2021.
- [17] Dobosy Á., "Tervezési határgörbék nagyszilárdságú acélokból készült, ismétlődő igénybevételű szerkezeti elemekhez," PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2017.
- [18] Kovács J., „A hőbevitel hatása ultra-nagyszilárdságú acélok tulajdonságaira huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéskor,” PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2024.
- [19] R. P. S. Sisodia, "High energy beam welding of advanced high strength steels," PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2021.

LÁNGEGYENGETÉSI HŐCIKLUSOK HATÁSA AZ S1100M ACÉL TULAJDONSÁGAIRA

Gáspár Marcell

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: marcell.gaspar@uni-miskolc.hu

Sahm Alden Abd Al Anis Mohammad

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: sahm.alden@uni-miskolc.hu

Gyura László

Hegesztéstechnológiai vezető, Linde Gáz Magyarország Zrt.

Cím: 1097 Budapest, Illatos út 17., e-mail: laszlo.gyura@linde.com

Absztrakt

Hegesztett szerkezetek gyártásakor sokszor elengedhetetlen lánggyengetést alkalmazni a hegesztés okozta maradó alakváltozás csökkentése céljából. A lánggyengetés a hegesztéshez képest a hőmérséklettől függően rendszerint nagyobb anyagtérfogatra terjed ki, amely jelentős változásokat tud okozni a szövetszerkeztben és a mechanikai tulajdonságokban. Ez különösen nagyszilárdságú acélok esetén lehet problémás, amelyeknél a hőbeviteltől függően kilágyulás és szívósságcsökkenés is előfordulhat. A lánggyengetés során alkalmazott éghető gázok hőfizikai jellemzőinek függvényében eltérő mértékű változások figyelhetők meg a hőhatásövezetben. A lánggyengetés nagyszilárdságú acélokra gyakorolt hatásáról napjainkban még korlátozottak az ismereteink. A fejezetben S1100M kategóriájú, ultra-nagyszilárdságú acél esetén vizsgáltuk a lánggyengetés hőciklusainak hatását. A kísérletek során a termoelemes mérésekkel felvett hőciklusokkal terheltük az alapanyagból kimunkált próbatesteket Gleeble 3500 fizikai szimulátor segítségével. Két éghető gázkeverék, acetilén és oxigén, valamint propán-bután és oxigén hatását elemeztük, három jellemző csúcshőmérséklet (1000 °C, 800 °C és 675 °C) és kétfajta hűlési mód (levegő és intenzív vízhűtés) kiválasztásával. A 675 °C-os hőciklusoknál maximum 2,5%, a 800 °C csúcshőmérsékletű, propán-bután hevítéses levegő hűtésű próbatesteknél pedig -9% mértékű kilágyulás volt tapasztalható. Az 1000 °C-os hőciklusnál 1-5% keményedést mértünk az alkalmazott gáz és hűtési mód függvényében.

Kulcsszavak: lánggyengetés, hőciklusok, nagyszilárdságú acélok, S1100M, fizikai szimuláció

Abstract

In the production of welded structures, it is often essential to use flame straightening in order to reduce the residual deformation caused by welding. Compared to welding, flame straightening usually affects a larger volume of material depending on the temperature, which can cause significant changes in the microstructure and mechanical properties. This can be particularly problematic in the case of high-strength steels (HSS), where softening and a reduction in toughness may occur in the

function of heat input. Depending on the thermophysical characteristics of the flammable gases used different degrees of change can be observed in the heat affected zone (HAZ). Nowadays, there is a limited knowledge on the effect of flame straightening on HSS. In this chapter, the effect of heat cycles of flame straightening was investigated in the case of S1100M category ultra-high strength steel. During the experiments, the specimens made from the base material were loaded with the heat cycles recorded during the preliminary thermocouple measurements using the Gleeble 3500 physics simulator. The effect of two combustible gas mixtures, acetylene and oxygen, as well as propane and oxygen were analysed for three typical peak temperatures (1000 °C, 800 °C and 675 °C) and two types of cooling methods (air and intensive water cooling). Softening was observed at all 675 °C thermal cycles in the maximum value of 2.5%, as well as at 800 °C peak temperature propane-butane heated air-cooled specimen (-9%). At the 1000 °C thermal cycle, 1-5% hardening was identified, depending on the gas and cooling method used.

Keywords: flame straightening, thermal cycles, high-strength steels, S1100M, physical simulation

1. Bevezetés

Az ultra-nagyszilárdságú acélok jelentős mértékben hozzájárulnak a járművek saját tömegének csökkentéséhez [1]. Az elmúlt évtizedek acélfejlesztései lehetővé tették 1000 MPa folyáshatárnál nagyobb szilárdságú acélok előállítását [1]–[6]. A járműszerkezetekben alkalmazott leggyakoribb kötéstechológia továbbra is a hegesztés. Például az alváz összetettebb alkatrészei több hegesztési varrattal készülnek. Ha a hegesztést követő alakváltozás elér egy határértéket, indokoltá válik korrekciós intézkedések végrehajtása [7]. A járműiparban leggyakrabban a hegesztés okozta maradó alakváltozás járul hozzá a munkadarabok méretváltozásához [8]. A hegesztési alakváltozások és a maradó feszültségek jellemzően negatív hatással vannak az összeszerelési folyamatra és a hegesztett szerkezetek fáradással szembeni ellenállására [9]. Ebből következően, számos kutatás foglalkozik a nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségével és a $t_{8/5}$ hűtési idő mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával. Az elvégzett vizsgálatok rávilágítanak arra, hogy – az acél minőségétől és az acélgyártási folyamattól függően – a hegesztési hőbevitel kedvezőtlen hatással van a mechanikai tulajdonságokra [2]–[6].

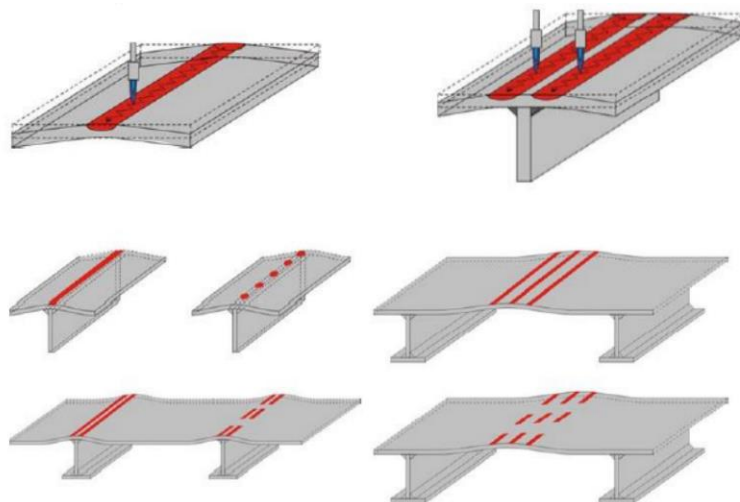
A lángerőnyelés az iparban széles körben alkalmazott és hatékony technológia, amellyel csökkenthető a hegesztett szerkezetek maradó alakváltozása azáltal, hogy fókuszált lángot alkalmaznak a szerkezet hegesztés vagy hőkezelés miatt alakváltozást szenvedett területeire. Az eljárás során az érintett területet jellemzően acetilén-oxigén vagy propán-bután-oxigén gázkeverékkel létrehozott lánggal melegítik fel a meghatározott hőmérsékletre. A propán-bután láng a kisebb, 2700 °C körüli égési hőmérsékletének köszönhetően a biztonságosabb alkalmazhatóságáról ismert, míg az acetilén a nagyobb, akár 3200 °C-ot elérő égési hőmérsékletével és a kiváló hőátadásával jellemezhető [10]. Ez a módszer helyi melegítést alkalmaz, ami az anyag további tágulását idézi elő, képlékeny alakváltozást okozva. A hőbevitel és az azt követő gyors lehűtés hatékonyan állítja vissza a gyártmány eredeti geometriáját. Ez a gyors hűtés segít a kívánt geometria elérésében, és hatással van a fém mechanikai tulajdonságait [11]. A járműiparban alkalmazott nagy- és az ultra-nagyszilárdságú acélok esetén a melegegyengetés során alkalmazott hőbevitel negatívan hat az ütközésben fontos funkciókat betöltő alkatrészek tulajdonságaira. Például az 1500 MPa szilárdsági kategóriájú Honda ajtógyűrű szilárdsága és szívóssága jelentős mértékben le tud csökkenni, ezáltal megszűnik azon képessége, hogy megvédje a jármű utasait, valamint, hogy elnyelje az ütközési energiát [12]. Napjainkban már számos publikáció [13]–[15] elérhető a nagyszilárdságú acélokra vonatkozóan a

hegesztési hőbevitel hatásáról, ugyanakkor még hiányosak az ismereteink a láncgyenygetési hőbevitelnek a mikroszerkezetre és mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásáról [16].

A láncgyenygetés hatékonysága számos tényezőtől függ, beleértve a kezelt acél típusát, a melegítés időtartamát és az alkalmazott hűtési módot. A kutatások kimutatták, hogy a nem megfelelő technológia a mikroszerkezet és a keménység megváltozásához vezethet, ami potenciálisan veszélyezteti a hegesztett szerkezet integritását. Például az X2CrNi22-2 duplex acélon végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a 730 °C feletti hőmérsékleten, hosszabb ideig tartó láncgyenygetés hátrányosan befolyásolja a kötés szilárdságát és mikroszerkezeti tulajdonságait [17]. Hasonlóképpen az S235JR, S460ML és S690QL acélok vizsgálata során kiderült, hogy bár a láncgyenygetés hatékonyan csökkenti a hegesztés okozta alakváltozást, ugyanakkor megváltoztatja az anyag mikroszerkezetét és keménységi jellemzőit a hőhatásövezetben [18]–[19].

Előnyei ellenére a láncgyenygetés számos kihívást jelent. A melegítés közbeni hőmérsékleteloszlás összetettsége miatt az anyagtulajdonságok romlásának megakadályozása érdekében gondos ellenőrzésre van szükség, különösen a nagyszilárdságú acéloknál [20]. A kutatásunk tárgyát képező S1100M acél mikroszerkezete elsősorban megeresztett martenzitből áll, amely a szilárdság és a szívósság szempontjából egyaránt kedvező szövetszerkezetnek minősül. Ezt a szövetszerkezetet a láncgyenygetés hőmérséklete visszafordíthatatlanul meg tudja változtatni, amelynek következményeként primer martenzit keletkezhet és szívósságcsökkenés következik be [4]–[5]. Ezért elengedhetetlen a megfelelő paraméterek meghatározása, például az optimális hevítési idő és hőmérséklet, hogy megfelelő eredményt érjünk el a szerkezet integritásának veszélyeztetése nélkül [20].

Összefoglalásként a láncgyenygetés alapvető technológiai folyamat a fémszerkezet gyártásban, amely amellet, hogy a hegesztési maradó alakváltozásokat részben vagy egészen megszünteti, szükségessé teszi az anyag hőterhelés alatti viselkedésének mély megértését is. A technológia fejlődésével az a képességünk is fejlődik, hogy ezt a technikát a műszaki alkalmazások szélesebb körére kiterjesszük, miközben biztosítjuk a szerkezeti integritás sértetlenségét.



1. ábra. A hőcsík, illetve vonalhevítés értelmezése, és különböző alkalmazási formái [11].

Korábbi vizsgálataink során [21]–[22] valós kísérleti körülmények között, vonalhevítést alkalmazva (1. ábra), mértük termoelemes méréssel a láncgyenygetés hőciklusait szerkezeti acélokon,

és fizikai szimulációval elemeztük a hőciklusok hatását az S355J2+N, XAR400 és S960QL acélminőségek tulajdonságaira. A kutatási tevékenység folytatásaként jelen kutatás célja a lángerőnyelési hőciklusok hatásának vizsgálata az S1100M szilárdsági kategóriájú acél szövetszerkezetére és keménységére. Ehhez három, a fázisátalakulások tekintetében karakterisztikus lángerőnyelési csúcshőmérsékletet (szubkritikus: 675 °C, interkritikus: 800 °C és A₃ feletti: 1000 °C) választottunk ki két hevítési (acetilén+ levegő, propán-bután+levegő) technológiával, illetve kétfajta hűtési móddal (levegő, víz).

2. Kísérleti körülmények

2.1. Alapanyag tulajdonságai

A kísérletekhez 15 mm vastagságú Alform 1100 x-treme (S1100M) lemezeket használtunk. Az alapanyag kémiai összetételét az 1. táblázat, mechanikai tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza. A karbonegyenértékek CEV=0,68% és CET=0,39% értékekre adódtak. A vizsgált termomechanikusan kezelt acélak viszonylag alacsony a karbontartalma, valamint a szennyezőtartalma (S, P) minimális. A mikroötvöző elemeknek (V, Ti, Al, Nb) meghatározó szerepük van a finom szemcseméretben. A króm, a molibdén és a nikkell az edződési hajlam és ezáltal a szilárdság növeléséért felel. A kimagasló folyáshatár mellett az S1100M acélak kedvező szívóssági tulajdonságai vannak negatív hőmérsékleten.

1. táblázat. S1100M alapanyag vegyi összetétele gyártói műbizonylat szerint [tömeg%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
0,1300	0,3200	1,6200	0,0090	0,0015	0,6300	0,0470	0,3200
Mo	V	Ti	Al	Nb	Zr	B	N
0,6200	0,0660	0,0110	0,0350	0,0370	N/A	0,0014	N/A

2. táblázat. S1100M alapanyag mechanikai tulajdonságai

Keménység, HV10 [-]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	KV [J] (-40 °C)
394	1193	1221	11,6	88

3. táblázat. Megengedhető lángerőnyelési hőmérsékletek CEN/TR 10347 [23] szerint

Szállítási állapot	Rövid idejű, felületi hevítés	Rövid idejű, teljes keresztmetszetű hevítés	Hosszú idejű, teljes keresztmetszetű hevítés
Normalizált, ötvözetlen acélok 355 MPa szilárdságig	≤ 900 °C	≤ 700 °C	≤ 650 °C
TMCP acélok 460 MPa szilárdságig	≤ 900 °C	≤ 700 °C	≤ 650 °C
TMCP acélok 500-700 MPa közötti szilárdsággal	≤ 900 °C	≤ 600 °C	≤ 550 °C
Q+T nagyszilárdságú acélok (például. S690QL, S960QL)	≤ általában 20 °C-kal a választott acélminőség megeresztési hőmérséklete alatt (hozzávetőlegesen 530 °C)		

TMCP: termomechanikusan kezelt; Q+T: nemesített

A CEN/TR 10347 „Útmutató szerkezeti acélok alakításához a feldolgozás során” előírás [23] ajánlásokat tartalmaz különböző lángergetési módszerek esetén a maximálisan megengedett lángergetési hőmérsékletekre. A gyakorlati tapasztalatok alapján a legtöbb esetben nem könnyű betartani a 3. táblázatban megadott maximális hőmérsékleteket, elsősorban a kézi lángergetési technika jellegéből adódóan. A táblázat alapján az S1100M anyagra nincs közvetlen ajánlás, ezért jelen kutatómunka hasznos információkkal szolgálhat a szabványalkotók számára.

2.2. Kísérleti módszer

Korábbi kutatómunkánk során [11], [21]–[22] valós lángergetési hőciklusokat mértünk termoelemes mérésekkel, hogy információt kapjunk a hevítési és hűtési viszonyokról (2. ábra). Ezután ezeket a hőciklusokat fizikai szimulációkhoz használtuk, amelyek során a vizsgált alapanyagokból kimunkált próbatesteket ezekkel a hőciklusokkal terheltük és különböző anyagvizsgálatokkal vizsgáltuk. Ugyanezeket a hőciklusokat alkalmaztuk jelen kísérleti munkánkban az S1100M acélminőség vizsgálatához is.

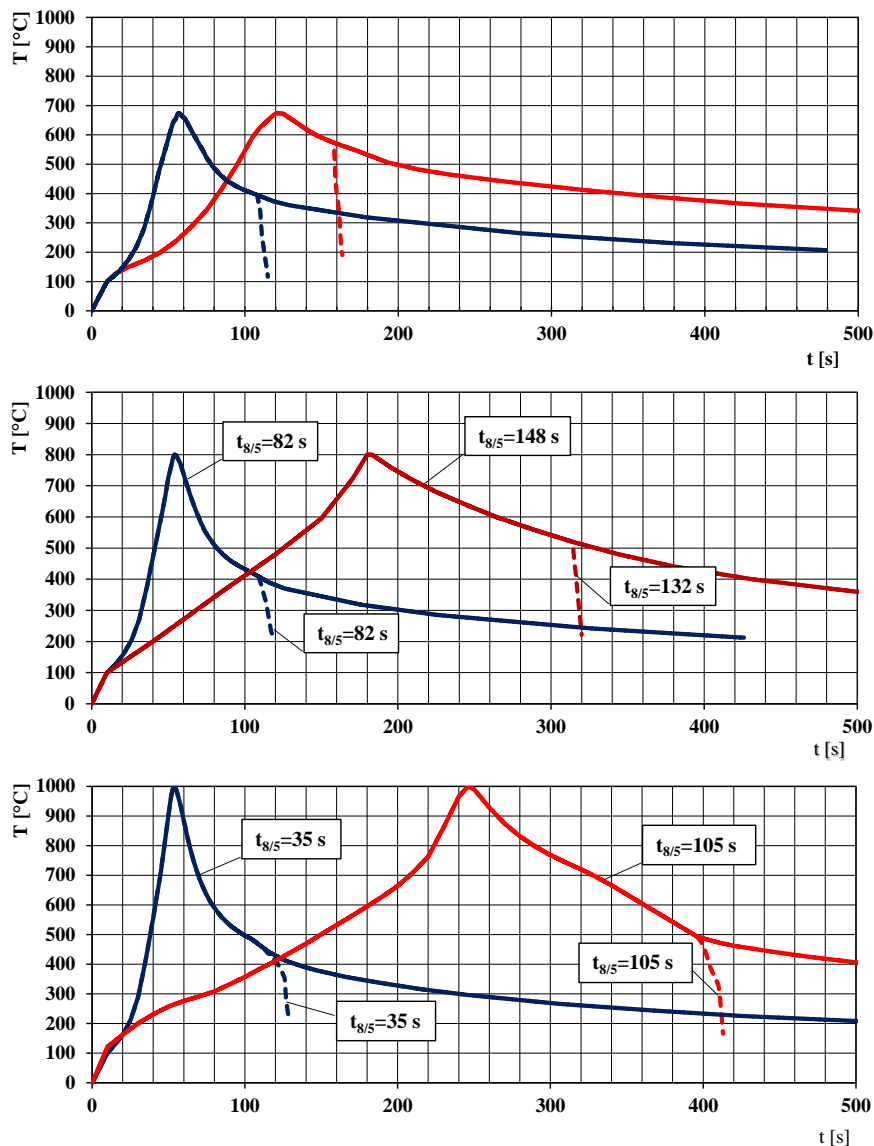


2. ábra. Lángergetési kísérlet a hőciklusok meghatározásához.

A következőkben rövid áttekintést adunk a termoelemes mérések kísérleti körülményeiről. A hegesztett szerkezetek lángergetése során a legelterjedtebb hevítési mód az égő vonalmenti mozgatása a lemez mentén. A vizsgálataink során S355J2+N lágyacélból készült $300 \times 300 \times 30$ mm-es lemezt hevítettünk a középvonala mentén. Minden esetben eltérő teljesítményű (a feladathoz ajánlott vagy kevésbé ajánlott) acetilén-oxigén (acetilén-sűrített levegő) és propán-bután-oxigén égőket alkalmaztunk. A középvonal mentén mechanikusan mozgatott égő sebességét előzetes kísérletek alapján választottuk meg, hogy biztosítsuk az egyengetéshez szükséges hőmérséklet kialakulását a lemez felső harmadában [11]. Az égő mozgási sebességétől függően a lemezek maximális hőmérséklete eltérő módon érhető el. Két hűtési körülményt, levegő- és vízhűtést alkalmaztunk a hevítés után. A termoelemekkel mért hőciklusok az S1100M acélminőség vizsgálatára is használhatók, mivel az S355J2+N és az S1100M acél hőfizikai tulajdonságai között nincs jellemző különbség, így a hevítési és hűtési körülmények közel azonosnak tekinthetők.

A fizikai szimuláció a lángergetési technológia hevítési és hűtési viszonyainak pontos ismeretét igényli. A vonalhevítés során mért hőciklusok alapján az S1100M acéllemezből a hőhatásövezeti vizsgálatokhoz ajánlott $10 \times 10 \times 70$ mm-es próbatesteket készítettünk. Ezeket a próbatesteket a Gleeble 3500 fizikai szimulátorban terheltük a meghatározott hőciklusokkal, míg a próbatestek hőmérsékletének mérését és szabályozását K típusú hőelemekkel végeztük el. A szimulációkhoz a nyugvó levegő- és a vízhűtés során mért hőciklusokat alkalmaztuk. A csúcshőmérsékletek kiválasztásakor az A_1 és A_3 átalakulási hőmérsékleteket vettük alapul, amelyek meghatározóak a

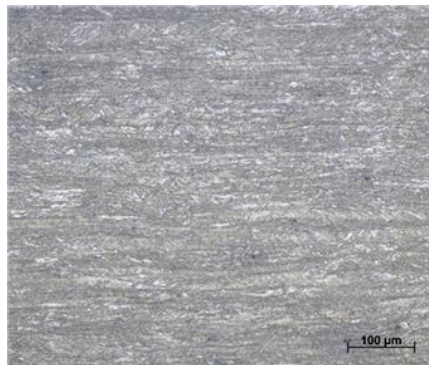
későbbi szövetszerkezet szempontjából. Három jellemző csúcshőmérsékletet választottunk ki: az A_1 hőmérséklet alatti (szubkritikus) szimulációhoz 675 °C -ot, az A_1 - A_3 közötti hőciklushoz 800 °C -ot (átlagos egyengetési hőmérséklet kis szilárdságú szerkezeti acéloknál az ipari gyakorlat szerint), az A_3 feletti (túlhevült) vizsgálatokhoz pedig 1000 °C -ot. Az alkalmazott hőciklusokat a 3. ábra szemlélteti [11]. A grafikonokból megállapítható, hogy a $t_{8/5}$ hűtési idő lángerőnyetésnél (35-132 s) sokkal hosszabb, mint ívhegesztésnél (5-30 s), ami növeli a kilágyulás és a szívósságcsökkenés kockázatát. A leghosszabb hűlési idő a propán-bután hevítésnél és levegő hűtésnél adódik, míg a legrövidebb az acetilén hevítéshez és vízűtéshez kapcsolódik.



3. ábra. Lángerőnyetési hőciklusok: acetilén/oxigén hevítés (kék), propán-bután/oxigén hevítés (piros), levegő (folyamatos vonal) és vízűtés (szaggatott vonal).

3. Anyagvizsgálati eredmények

A Gleeble próbatesteket a hőelemeknél középen elvágtuk. Ezután a felületet négy különböző érdességű csiszolópapírral csiszoltuk, políroztuk, végül Nital (2% HNO₃) marószerszel marattuk a Zeiss Axio Observer D1m berendezésen elvégzett optikai mikroszkópos vizsgálatokhoz. Az alapanyag finomszemcsés, alapvetően martenzites mikroszerkezetét a 4. ábra szemlélteti a termomechanikus hengerlési folyamatból adódó jellegzetes szemcseorientációval (elnyújtott szemcsék).



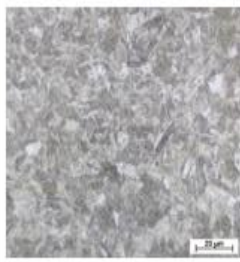
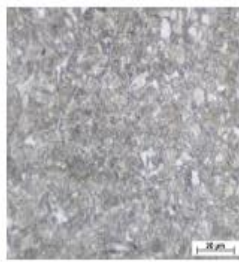
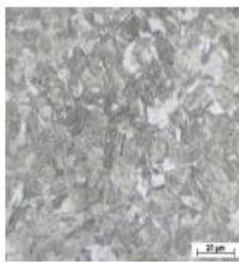
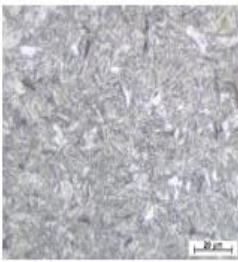
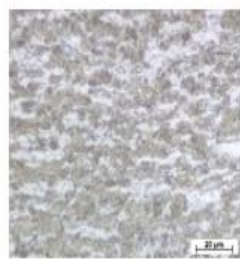
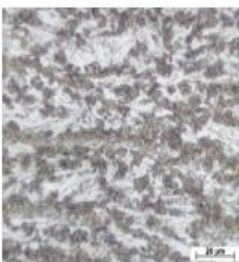
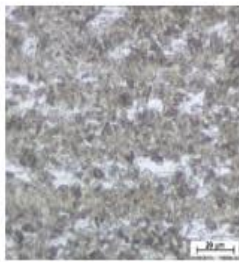
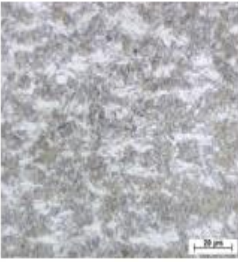




4. ábra. Az S1100M alapanyag szövetszerkezete, (2% Nital, $M=1000\times$).

A keménységmérésekhez Reicherter UH250 univerzális keménységmérő berendezést használtunk. A szimulált zónák mikroszerkezetét és a lángerőgyengető hőciklusokon alapuló keménységét az 5. ábra mutatja be. Az alapanyag keménysége 394 HV10 volt. Az alapvetően rendkívül finomszemcsés, 1000 MPa feletti szilárdságot eredményező mikroszerkezet az optikai mikroszkópos vizsgálatok alapján a 675 °C-os hevítés során többnyire érintetlen maradt. Ezt a keménységmérések eredményei igazolják, mert az alapanyag kezdeti keménységi értékéhez képest viszonylag kis eltérés volt tapasztalható. A megeresztésből adódóan arra is lehet következtetni, hogy az alapanyagra jellemző szívóssági értékek feltételezhetően kedvezőbben alakultak, mint a többi próbatest esetén.

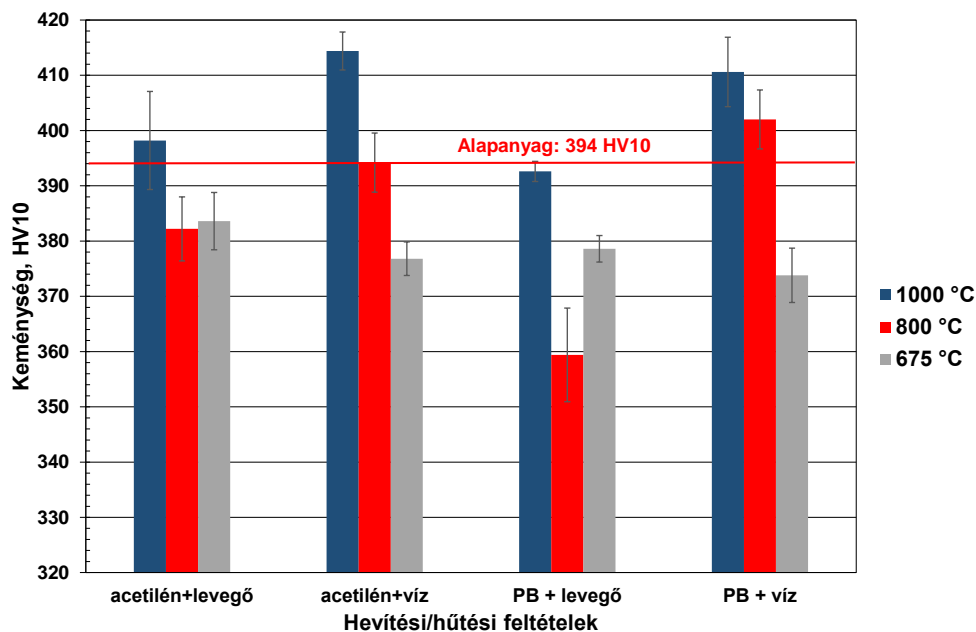
A 800 °C-hoz tartozó mikroszerkezeti képek az interkritikus zóna tulajdonságait hordozzák az ausztenitesedett részek és a megeresztett szövetelemek keverékével. A teljes ausztenitesítés itt nem történik meg, mert az ehhez szükséges energia- vagy időigény nem teljesül, legfeljebb csak a szemcsehatárokon. Ez egy heterogén szerkezet, amelyben a világosra maródott részek kisebb szilárdságú szövetet jeleznek, a sötét színűek pedig részben martenzit-ausztenit (M-A) szigetekre utalhatnak. Ezen részek pontosabb elemzéséhez speciális maratási technikára lenne szükség. Ez az interkritikus zóna a nagyszilárdságú acéloknál általában kis szívóssági értékekkel jellemezhető, hasonlóan a durvaszemcsés zónához, különösen az M-A szigetek jelenlétében [15]. A vízhűtéses próbatesteknél a mért keménységi értékek átlaga vagy nem változott, vagy kisebb mértékben nőtt. A kevésbé intenzív, léghűtéses minták esetében az átlagos keménység az acetilén lángtechnológiánál valamivel kisebb az alapanyaghoz képest, a propán-bután hevítésű próbatestek viszont jelentős (akár 9%) keménységcsökkenést mutatnak. A sötét-világos arány minden esetben változik, annak ellenére, hogy a maximális hevítési hőmérséklet azonos, és az átlagos keménységi értékek is jelentősen eltérnek. Ez azzal magyarázható, hogy az acetilénnel intenzívebben hevített próbatesteknél, különösen, ha azt nagyon gyors vízhűtés követi, nem jut elég idő a teljes ausztenitesítésre. Ez az arány a propán-bután hevítésű, léghűtéses próbatestnél tér el legjelentősebben, amit a mikroszkópos felvételek is alátámasztanak. Ha a lángerőgyengetésen átment acélszerkezet dinamikus vagy ismétlődő

igénybevételnek van kitéve, akkor az ilyen paraméterek melletti lángergetést, amely az A₁-nél nagyobb csúcshőmérsékletet eredményez, kerülni kell.

Ha a hevítési hőmérséklet maximumát még tovább, egészen 1000 °C-ra emeljük, a vízhűtéses mintákon az átlagos keménység növekedése figyelhető meg. A mikroszerkezeti képeket nézve valószínűsíthető, hogy minden esetben martenzites szemcseszerkezet alakult ki, amit a keménységi értékek is igazolnak. Ebben a zónában megváltozik az alapanyag eredeti finomszemcsés mikroszerkezete.

Gáz	Acetilén/oxigén		Propán bután/oxigén	
	Víz	Nyugvó levegő	Víz	Nyugvó levegő
1000 °C				
Keménység HV10	414	398	411	393
800 °C				
Keménység HV10	394	382	402	359
675 °C				
Keménység HV10	377	384	374	379

5. ábra. A szimulált zónák szövetszerkezete és keménysége (Nital, M=1000×).



6. ábra. A szimulált lánggyengetési zónák keménysége különböző hevítési/hűtési viszonyok esetén.

A 6. ábrán szereplő diagram a mért keménységértékeket mutatja minden hevítési és hűtési körülményre. A keménységértékek közel azonos tartományba esnek, mint a hegesztési körülményekre vonatkozó hőhatásövezeti szimulációknál [24]. A keménységi értékek a 394 HV10 alapanyag keménységétől -9 és +5% távolságra helyezkednek el. A legnagyobb keménységértékek az 1000 °C-hoz, míg a kisebbek a 675 °C-os és 800 °C-os csúcshőmérséklethez tartoznak. Figyelembe véve az interkritikus (800 °C) csúcshőmérséklet feltételezett rideg viselkedését [15], a vizsgált S1100M acél esetében a subkritikus lánggyengetési hőmérséklet javasolt, acetilén hevítéssel és léghűtéssel, a kilágyulás minimalizálása érdekében.

4. Összefoglalás

A lánggyengetés hőciklusainak mikroszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását sikeresen elemeztük a vizsgált S1100M ultra-nagyszilárdságú acél esetében. Az elvégzett fizikai szimulációs kísérletek alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

1. Az 1000 °C-os csúcshőmérséklet esetén minden hevítési és hűtési körülmény között keményedést tapasztaltunk. A legnagyobb (+5%) keményedést az acetilén hevítés és a vízhűtés eredményezte.
2. A 800 °C-os csúcshőmérsékletű zóna esetében egyaránt tapasztaltunk kilágyulást és keményedést. A legkisebb keménységet a levegő hűtéssel kombinált propán-bután hevítés (-9%) eredményezte, míg a legnagyobb keménységet a vízhűtésű propán-bután melegítésnél mértük. A keménység eredmények értékelése szempontjából az acetilén hevítés és vízhűtés lenne a legkedvezőbb kombináció, azonban ez a heterogén mikroszerkezet rideg viselkedést mutathat az M-A szigetek jelenléte miatt.
3. A 675 °C-os csúcshőmérséklet minden hevítési és hűtési körülménynél kilágyulást eredményezett. A legkisebbet (-2,5%) az acetilénhevítésnél és levegő hűtésnél tapasztaltuk.

4. Legfeljebb 675 °C csúcshőmérséklet ajánlható lánggyengetéshez, figyelembe véve a szubkritikus (A_1) kezelés megeresztő hatását is, amely az alapanyaghoz hasonló szívós mikroszerkezetet eredményez.

Irodalom

- [1] H. Chen *et al.*, „Progress and perspective of ultra-high-strength martensitic steels for automobile,” *J. Met.*, vol. 12, no. 12, 2022, Art. no. 2184, doi: 10.3390/met12122184.
- [2] J. Kovács and J. Lukács, „Influence of Filler Metals on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Metal Arc Welded High Strength Steel,” *Lect. Not. in Mech. Eng., Vehicle and Automotive Engineering*, vol. 4, pp. 995-1005, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-15211-5_83.
- [3] M. Tümer *et al.*, „Residual stresses, microstructure, and mechanical properties of electron beam welded thick S1100 steel,” *Jour. of Mat. Eng. and Performance*, vol. 31, pp. 2136-2146, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-06348-1.
- [4] R. P. S. Sisodia *et al.*, „Investigation of the effects of beam oscillations in electron beam-welded S1100M TMCP steel,” *Weld. in the World*, vol. 68, pp. 1525–1537, 2024. doi: 10.1007/s40194-024-01765-x.
- [5] M. Tümer *et al.*, „Welding of S1100 Ultra high Strength Steel Plates with Matching Metal Cored Filler Wire: Microstructure, Residual Stresses, and Mechanical Properties,” *Steel Res. Int.*, vol. 95, no. 5, 2024, Art. no. 2300675, doi: 10.1002/srin.202300675.
- [6] M. Weglowski *et al.*, „Physical simulation of weldability of Weldox 1300 steel,” *Mat. Sci. Forum*, vol. 762, pp. 551-555, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.762.551.
- [7] D. Tikhomirov *et al.*, „Computing welding distortion: comparison of different industrially applicable methods,” *Adv. Mat. Research*, vol. 6, pp. 195-202, 2005, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.195.
- [8] Y. Liu *et al.*, „Deformation Analysis for Welding Assembly Processes of Automobile Panels,” *Adv. Mat. Research*, vol. 118, pp. 70-74, 2010, doi: 10.1002/qre.1550.
- [9] H. Huang *et al.*, „Analysis of Welding Deformation and Residual Stress in Automotive Engine Cradle by i-ISM and DMRM,” *Preprints of the National Meeting of JWS*, pp. 1-2, 2014.
- [10] D. Schäfer *et al.*, „Optimisation and improvement of the flame straightening process (Optistraight),” European Commission Research Fund for Coal and Steel, Luxembourg; 2012.
- [11] L. Gyura, „Lángtechnológiák hatása a nagyszilárdságú acélok tulajdonságaira,” PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2021.
- [12] B. Zuidema, „Why heat, flame straightening will weaken higher-strength auto steels,” Accessed: 2024.12.01 [Online] Available: <https://www.repairerdrevennews.com/2015/12/22/zuidema-why-heat-flame-straightening-will-weaken-higher-strength-auto-steels/>
- [13] M. Amraei *et al.*, „Mechanical properties and microstructural evaluation of the heat-affected zone in ultra-high strength steels,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 157, 2020, Art. no. 107072, doi: 10.1016/j.tws.2020.107072.
- [14] R. P. S. Sisodia *et al.*, „Synchrotron diffraction residual stresses studies of electron beam welded high strength structural steels,” *Jour. of Mat. Res. and Techn.*, vol. 30, pp. 6291-6300, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.04.240.
- [15] M. Gáspár, „Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel,” *J. Met.*, vol. 9, no. 11, 2019, Art. no. 1226, doi: 10.3390/met9111226.
- [16] R. Lacalle *et al.*, „Influence of the Flame Straightening Process on Microstructural, Mechanical

- and Fracture Properties of S235JR, S460ML and S690QL Structural Steels,” *Exp. Mech.*, vol. 53, pp. 893-909, 2013, doi: 10.1007/s11340-013-9723-8.
- [17] A. Lange, „Influence of flame straightening on the properties of welded joints made of X2CrNi22-2 duplex steel,” *Mater. Sci. Pol.*, vol. 39, pp. 446-457, 2021, doi: 10.2478/msp-2021-0036.
- [18] H. A. Fadly *et al.*, „Effect of flame straightening treatment on the microstructure of fillet weld S355J2+ N steel,” *Metallurgija*, vol. 62, no. 2, pp. 223-226, 2023.
- [19] N. N. Astuti *et al.*, „Microstructure analysis of dissimilar metals weld between S690Q and S355J2+ N steel under flame straightening treatment,” *Metallurgija*, vol. 62, no. 2, pp. 219-222, 2023.
- [20] M. Feldmann and D. Schaefer, „Flame straightening of normal and high strength steels-part 1.,” *Stahlbau*, vol. 88, no. 10, pp. 945-956, 2019, doi: 10.1002/stco.202070104.
- [21] M. Gáspár *et al.*, „The Effect of Multiple Flame Straightening on High-Strength Steels Applied in Vehicle Industry,” *Lect. Not. in Mech. Eng.*, Vehicle and Automotive Engineering, vol. 4, pp. 893-903, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-15211-5_74.
- [22] L. Gyura *et al.*, „The effect of flame straightening on the microstructure and mechanical properties of different strength steels,” *Weld., in the World*, vol. 65, no. 3, pp. 543-560, 2021, doi: 10.1007/s40194-020-01055-2.
- [23] *Guidance for forming of structural steels in processing*, CEN/TR 10347, 2006.
- [24] J. Kovács, " A hőbevitel hatása ultra-nagyszilárdságú acélok tulajdonságaira huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéskor," PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2024.

Making our world more productive

Linde

Egyedi megoldások - széles körű alkalmazások

THERMAL SIMULATION OF RESISTANCE SPOT WELDING IN CASE OF DP600 STEEL

Sahm Alden Abd Al Anis Mohammad

PhD student, University of Miskolc, Institute of Materials Science and Technology,
Department of Mechanical Technology
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: sahm.alden@uni-miskolc.hu

Meilinger Ákos

Associate Professor, University of Miskolc, Institute of Materials Science and Technology,
Department of Mechanical Technology
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Ellenállás-ponthegeztésnél villamos áramot vezetünk át az összehegeztendő alapanyagokon, ami ellenálláshő által megolvasztja az alapanyagokat és hegesztett kötést hoz létre. A folyamat rendkívül gyors, így nehézkes a hőciklus pontos mérése a heglencsében, valamint a hőhatásövezetben. Ebben a cikkben 2 dimenziós aszimmetrikus vége-selemes modell alkalmazásával készült hőmérséklet-eloszlást, valamint annak időbeli lefutását elemezzük. A szimulációhoz a SYSWELD vége-selemes modellező szoftvert alkalmaztuk, mellyel egy lágy munkarendű és egy 2 impulzusos ellenállás-hegesztési technológiát modelleztünk. Bemeneti paraméterként ugyanazokat az áramerősségeket, hegesztési időket és elektród erőket állítottuk be, amelyeket a valóságban is használunk, valamint a hegesztő elektród kialakítás is megegyezett a valósággal. Az eredmények alapján összehasonlítottuk a két hegesztéstechnológiát, valamint meghatároztuk a hegesztett kötés különböző részeihez tartozó hegesztési hőciklusokat is.

Kulcsszavak: ellenállás-ponthegeztés, FEM, SYSWELD, hőmérséklet-eloszlás, DP600, hűlési sebesség

Abstract

The resistance spot welding (RSW) process relies on electrical resistance heating to create localized melting and fusion of metal sheets. When an electric current passes through the metal workpieces, it encounters resistance, which generates heat according to Joule's law. In this paper, a thermal simulation of the RSW process was conducted using a two-dimensional (2D) axisymmetric finite element model (FEM) developed with software, SYSWELD, to simulate temperature distributions for two welding technological parameters, single pulse long-time and double pulse weld various weld stages, and to evaluate the effects of welding parameters such as current, time, and electrode force. The input data (electrode shape, plate thickness, and welding parameters) used in the simulation is identical to the experiments conducted previously in physical thermal measurement research to validate the simulation outcomes and demonstrate the consistency between predicted and observed thermal cycle under RSW conditions.

Keywords: RSW, FEM, SYSWELD, heat dissipation, DP600, cooling rates

1. Introduction

Resistance spot welding is the primary assembly method for automotive bodies due to its speed, automation potential, cost-effectiveness, and cleanliness [1]. RSW is noted to provide better crashworthiness compared to other welding processes [2]–[3]. This welding technique is particularly well-suited for the sheet metals commonly used in automotive construction, offering a fast and efficient process that can produce over 5,000 welds in a typical car [4]–[5].

The resistance spot welded joint is divided into three main zones the fusion zone (FZ), the heat affected zone (HAZ), and the base metal (BM). The heat affected subzones with distinct temperature ranges include upper-critical heat affected zone (UCHAZ) and consists of the UCHAZI, called coarse grain zone, and the UCHAZII, called fine grain zone (800 °C to 1200 °C), typically denoted as A_{c3} , intercritical heat affected zone (ICHAZ) (720 °C to 790 °C), and sub-critical heat affected zone (SCHAZ) (350 °C to 650 °C) donated below the A_1 transformation temperature. [6]–[8]. Figure 1 shows a schematic drawing of the RSW FZ and HAZ subzones.

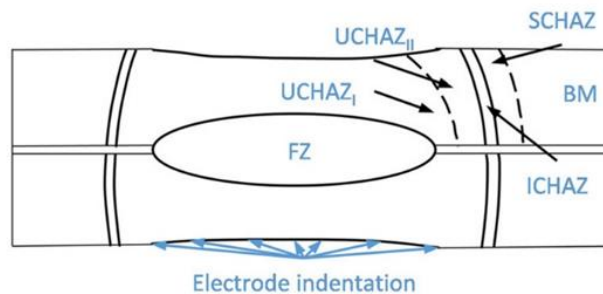


Figure 1. Schematic illustration of RSW HAZ subzones [9].

During RSW, the steel is rapidly heated to temperatures above its melting point (> 1400 °C) in the FZ followed by subsequent rapid cooling, which occurs primarily through heat dissipation to the electrodes [10].

Heat dissipation in RSW involves conduction, where heat spreads through the metal sheets and welding electrodes influenced by their thermal conductivity; convection, which can be applicable if a water-cooling system is applied in electrodes; and radiation, which plays a minor role but can contribute to heat loss at higher temperatures as shown in Figure 2 [11].

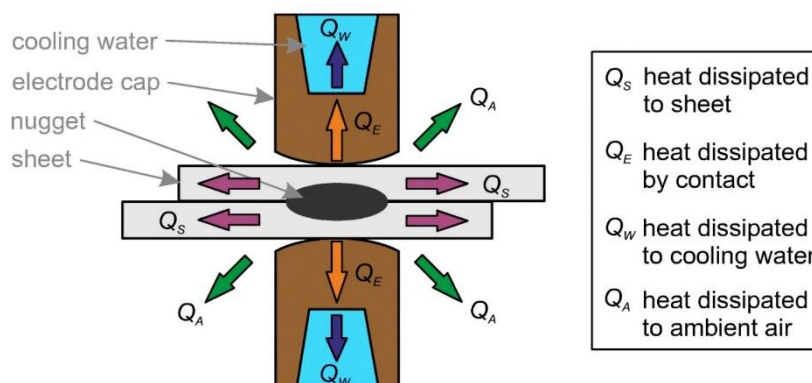


Figure 2. Schematic illustration of heat dissipation in RSW [11].

The HAZ surrounds the FZ and undergoes solid-state phase transformations without melting showing varying microstructures due to different peak temperatures and cooling rates experienced in the different subzones [5], [12].

The BM remains unaffected by the heat, retaining its original microstructure while the temperatures within the HAZ can vary significantly depending on the welding process, material properties, and specific conditions. Analyzing the cooling rates through continuous cooling transformation (CCT) diagrams shows how different microstructural phases developed in the FZ [13].

There are several critical parameters that influence the RSW process, e.g.: squeeze time which is the initial period when electrodes apply pressure to the metal sheets before current flows; welding current which is the magnitude of the electric current flowing through the electrodes; welding time which is the duration of flowing applied current; hold time which is the time electrodes remain in place after the current stops, allowing the weld to cool under pressure; and electrode pressure which is the force exerted by the electrodes to hold the workpieces securely in place during welding [5]. Figure 3 shows a schematic drawing example of the welding cycle used for RSW.

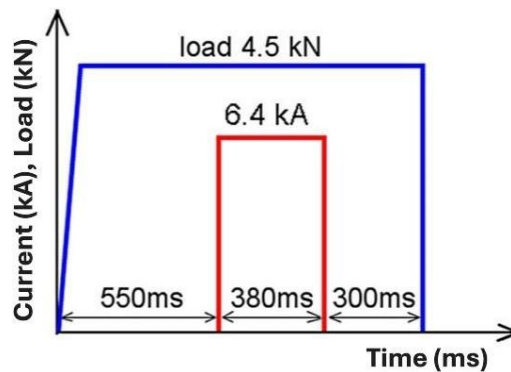


Figure 3. RSW schedule scheme [14].

Understanding the effects of welding parameters on the thermal cycle (temperature-time) in RSW is crucial for optimizing these parameters and achieving the required high-performance spot joint [8]. For instance, in pulse technological welding parameters varying the second pulse current in a pulsed RSW schedule can modify the weld thermal cycle and alter cooling rates during welding [15]–[16].

1.1. Finite Element Modelling

Weld simulation tools are very useful when assessing the weldability of new materials and optimizing the welding parameters and can be used to analyze weld thermal cycles and optimize the weld. FEM simulations were applied to investigate the thermal cycles of RSW, and experimental techniques for correlating welding parameters with thermal history, microstructure, and mechanical properties [15]. For instance, Finite element analysis (FEA) effectively simulated the RSW welding process, revealing a maximum cooling rate at the center of the FZ, notably, cooling rates decreased with distance from the FZ center, towards the SCHAZ [17]. Ensuring the simulation results align with experimental outcomes is critical for building confidence in predictive models. However, discrepancies between simulated and actual results can arise from simplifications made during modeling, inaccuracies in input data [18]–[19], or due to severe conditions that may not be validated experimentally like melted weld metal [20]. Nevertheless, the process of spot welding is a highly non-linear, multi-parameter, and complicated process containing a large number of random factors. Only through experimental study

can we obtain insightful and knowledgeable information about the welding process. Combining the finite element numerical simulation with experimental research provides a very valuable method for welding process parameters recommendation to get sound welding joints in actual production [21].

Figure 4 shows a visual representation of the validation framework for the numerical models employed in RSW simulations. Successful validation of resistance welding models requires a careful balance of theoretical assumptions and practical observations, ultimately leading to more reliable predictions of welding behavior and outcomes. This iterative approach not only improves model accuracy but also enhances the understanding of the complex interactions in resistance welding, paving the way for better process control and optimization in industrial applications [20].

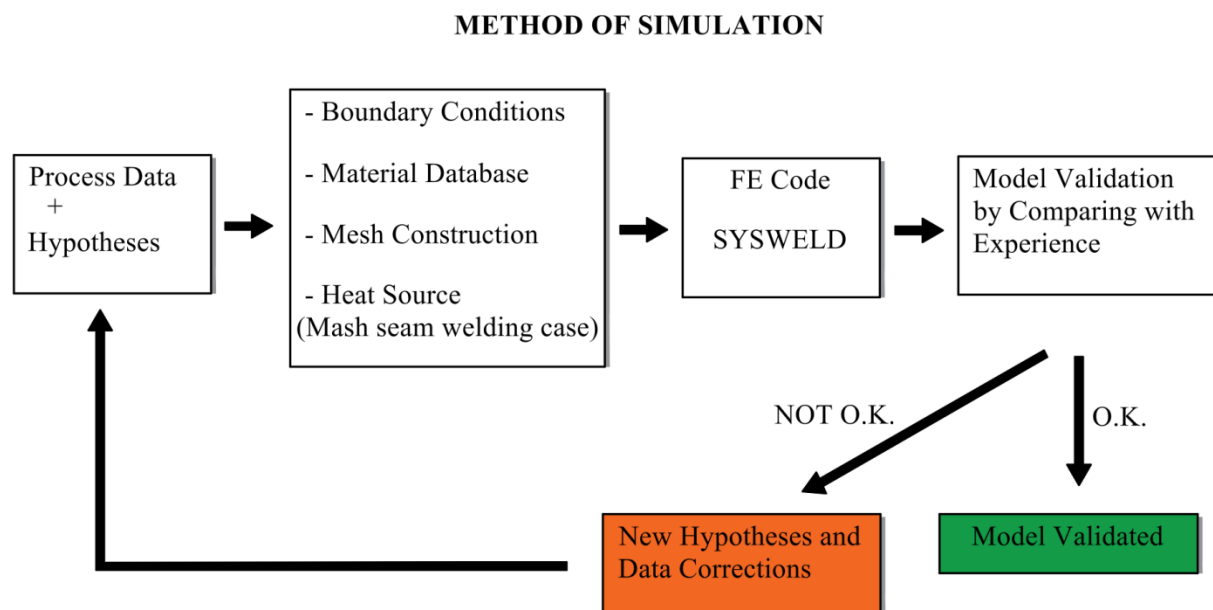


Figure 4. RSW simulation methodology of FEM software [20].

The researchers validated their FEM against experimental data, confirming its accuracy in predicting microstructural evolution and temperature distributions [22]. The relative error between numerical and experimental results is less than 7%. This relatively small error indicates that the numerical analysis can accurately predict the joint strength. Hence, FEM simulation can be used as a useful tool with relatively low cost and without destructive tests to investigate the RSW process and predict its prominent quality measures [23].

Modeling the RSW process requires accounting for complex thermoelectric behavior and carefully defining parameters, including boundary conditions, applied voltage, current load, electrode force, and varying convection coefficients to simulate environmental and cooling water effects accurately [24].

The main methods for simulating the RSW process are thermal models, electro-thermo-mechanical models, electro-thermal models with fluid flow, and electro-thermal models which combine electrical and thermal properties to show how electrical current influences heat generation within the workpieces. The models incorporate temperature-dependent properties of materials and simulate how heat affects the FZ formation and overall weld integrity [25]. The simulation software allows for the analysis of time-based temperature changes providing comprehensive thermal analysis and

temperature-time profiles [26]. The model accounts for transient heat conduction and Joule heating effects within the electrode and sheet assembly. The simulation incorporates temperature-dependent material properties, ensuring a realistic depiction of heat distribution during welding. The temperature of critical contact areas, such as the electrode-sheet interface, plays a pivotal role in heat dissipation. The temperature distribution varies throughout the weld cycle, peaking at the center of the faying surface [27].

The meshing strategy aimed to balance accuracy and computational efficiency. The mesh density should likely be refined in areas with higher thermal gradients, such as the faying surface, to capture detailed temperature distributions and FZ formation [27]. Mesh construction does not present much difficulty, especially if a 2D structure is chosen. The refinement by increasing the number of elements should be optimized in the FZ and the HAZ regions, where steep temperature gradients are found [20]. Continuous advancements in simulation techniques and validation methods will enhance the effectiveness of RSW simulations using SYSWELD in practical applications.

1.2. SYSWELD

SYSWELD is a Finite Element Analysis software developed by ESI Group, designed specifically for simulating various welding processes, including RSW. It integrates multiple physical phenomena such as thermal, metallurgical, and mechanical behaviors to provide a comprehensive analysis of the welding process, thus facilitating the optimization of welding parameters and sequences [28]. This holistic approach enables accurate predictions of weld quality and structural integrity. The software includes an extensive material database covering base metals and welding electrodes, which aids in selecting appropriate materials for specific applications [28]. The simulation of RSW involves modeling the heat generation due to electrical resistance as well as the mechanical forces acting on the materials being joined. The software simulates the temperature distribution within the workpieces during welding. Accurate modeling of heat transfer is essential for understanding the cooling rates and phase transformations that occur post-weld [29]. Research has shown that using SYSWELD for RSW simulations can significantly reduce design errors and improve product quality by allowing engineers to visualize potential issues before physical prototyping [29]–[30].

Several challenges remain that can impact the accuracy and reliability of its predictions. Addressing these challenges involves improving thermal modeling techniques. Understanding material behavior under extreme conditions, accurately representing contact mechanics.

The contact resistance at the interface between the electrodes and workpieces can significantly influence heat generation and distribution. Modeling this resistance accurately is challenging due to its dependence on factors such as surface roughness, material properties, and contact pressure, for instance, the friction between contacting surfaces during welding can affect heat generation and material flow [18]. The heat generation due to electrical resistance must be modelled accurately, as it varies with time and location during the welding process. SYSWELD relies on FEA methods to simulate these dynamics, but achieving a fine mesh to capture these rapid changes can be computationally intensive [19], [28].

The successful application of RSW hinges on a thorough understanding of thermal dynamics and careful control of process parameters. By utilizing advanced modeling techniques and optimization strategies, researchers and engineers can significantly improve the reliability and safety of welded joints, which is paramount in high-stakes applications such as automotive manufacturing. This knowledge is very important, providing a solid foundation for exploring innovative solutions in RSW technology [31].

2. Material and Method

The FEM model was employed to simulate the RSW process to quantitatively understand the effects of the process parameters on temperature distribution at two different welding technological parameters (long-time single pulse and double pulse). Temperature-dependent physical and mechanical properties of materials, including thermal conductivity, coefficient of thermal expansion, electrical resistance, specific heat, density, enthalpy, elasticity of yield stress, and Poisson's ratio, were implemented for electro-thermal RSW simulation. The temperature distribution was considered for an increment from fully coupled electrical thermal FEA. The electrical and thermal boundary conditions were also considered in the model. Although the nature of the heat flow is three-dimensional, it can also be simulated in the form of the two-dimensional axisymmetric model, because the circular section of the electrode can be applied to both current and compressive force at the same time [21]. Two-dimensional axisymmetric thermal-electrical (transient heat conduction) FEM were developed to simulate the welding process of DP600 dual-phase steel with 1 mm thickness, using the SYSWELD finite element software. The chemical composition and the mechanical properties of DP600 a product of SSAB are shown in Tables 1 and 2 respectively as per datasheet.

Table 1. The chemical composition of the Docol DP600 steel [weight%]

Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	B
DP600	0,098	0,200	0,810	0,015	0,002	0,014	0,010	0,0002

Table 2. The mechanical properties of the Docol DP600 steel

Steel grade	Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	Tensile strength R_m [MPa]	Elongation A_{80} [%]	Hardness HV10 [-]
DP600	448	669	18.7	204

RSW experiments were previously conducted using the same welding input data as the simulation for comparison with physical heat cycle measurements, validating the model's accuracy. The samples were welded with selected welding parameter combinations to ensure welding quality. The process parameters were determined based on prior research findings. The welding process includes four stages: squeezing, welding, holding, and cooling. The parameters used in both experiments and simulations are listed in Table 3.

Table 3. Parameters of RSW technologies

Welding technology	Weld current [kA]	Welding time [ms]	Pulse number	Pause time [ms]	Welding force [kN]
Long-time	8.5	320	1	N/A	5
2-pulses	6.4	120	2	300	3

3. Results and discussion

The simulation outcomes present visual analyses of thermal cycle histories during RSW, showcasing temperature distributions in contour plots and graphs depicting temperature vs time curves for different zones under double-pulse and long-time welding conditions, facilitating an in-depth examination of heat propagation and dissipation.

In a two-pulse weld simulation, the contour plot indicates temperature distribution in the workpiece, with a temperature scale on the left ranging from approximately 12 °C to over 1600 °C. The hottest region, shown in magenta and red, corresponds to the FZ, with peak temperatures above 1600 °C. This region is where melting and potential fusion occur, forming the core of the weld. Surrounding the FZ there are heat affected zones depicted in gradient colors (orange, yellow, and green). These areas experience significant temperature exposure but remain below the melting point, affecting the microstructure without full melting. The contour plot also indicates how far the heat extends into the surrounding material, transitioning to lower temperatures (blue areas) as the distance from the weld center increases. Figure 5 shows a simulation of a two-pulse RSW process.

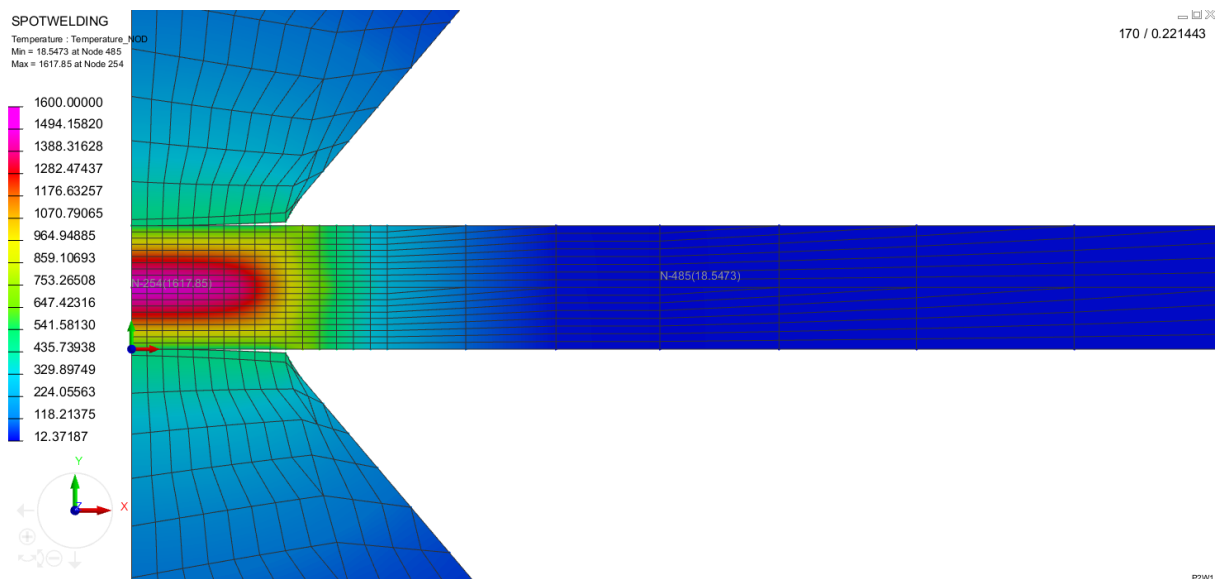


Figure 5. Simulation of a two-pulse RSW process.

In long-time weld simulation, the temperature profile in this case exhibits a broader and more uniform distribution compared to the two-pulse weld. The FZ still has the highest temperature region, indicated by magenta and red, but the heat spreads further into the material, shown by the wider extent of orange and yellow colors. The maximum temperature is similarly high (above 1600 °C), but the longer heating duration allows for greater heat penetration and slower cooling throughout the material. HAZ extends further, with gradual temperature gradients transitioning from the FZ high temperature to lower temperatures across the workpiece. Figure 6 shows a simulation of a long-time RSW process.

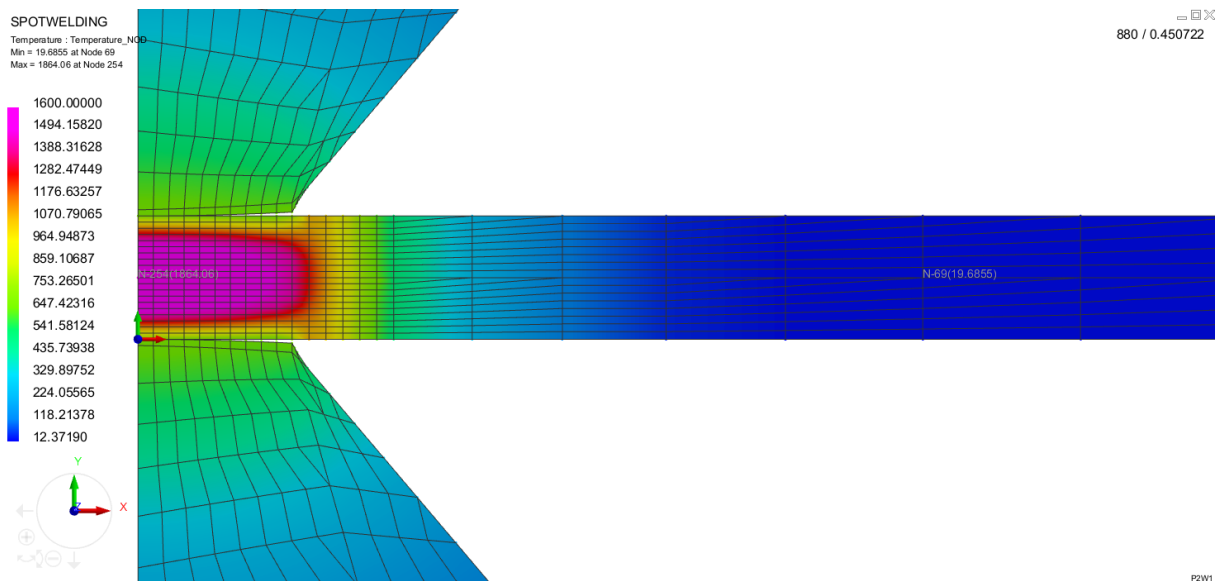


Figure 6. Simulation of a long-time RSW process.

As can be seen in Figure 7, in case of the double-pulse weld thermal cycle history, the red curve (FZ) shows two significant temperature peaks, indicating the application of two distinct heating pulses. The highest peak surpasses 1500 °C, representing the molten state of the FZ. The other zones (UCHAZ, ICHAZ, and SCHAZ) experience smaller, smoother temperature profiles. The UCHAZ reaches a notable peak temperature above 1000 °C, while the ICHAZ and SCHAZ have progressively lower peaks, indicating less heat influence as the distance from the weld center increases. The thermal cycle of the FZ demonstrates rapid heating and cooling during the first pulse, followed by a secondary heating pulse, which contributes to reinforcing the weld.

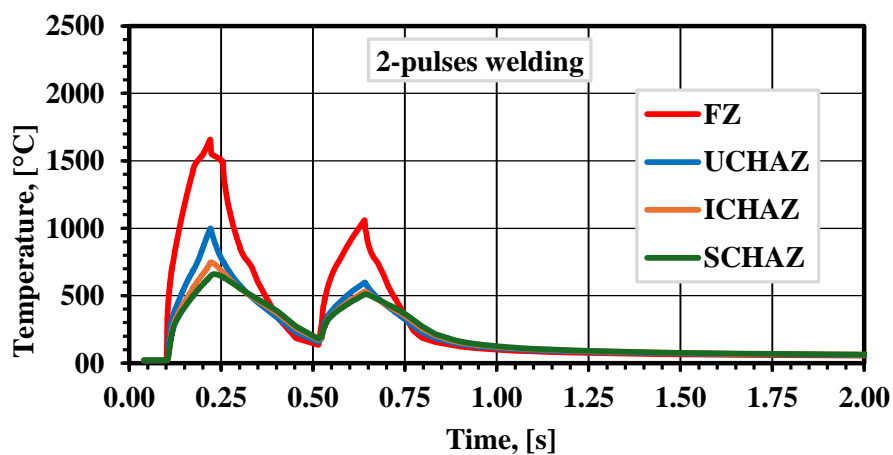


Figure 7. Thermal cycle history of different zones in double-pulse RSW.

As shown in Figure 8, in case of the long-time weld thermal cycle history, the red curve (FZ) has a single, substantial temperature peak that exceeds 2000 °C, showing a continuous heating phase

indicative of a longer welding cycle. The UCHAZ, ICHAZ, and SCHAZ curves reflect different levels of heat penetration. The UCHAZ reaches approximately 1000 °C, implying significant thermal exposure but less than the FZ. The ICHAZ and SCHAZ curves peak at progressively lower temperatures, with SCHAZ remaining below 500 °C. The longer duration of heat application results in slower cooling rates, especially noticeable in the UCHAZ and SCHAZ curves. This sustained heat allows more extensive microstructural changes to occur in the HAZ. The long-time welding approach results in a higher peak temperature for the FZ and more gradual cooling for the HAZs than double pulse weld, potentially leading to larger HAZ and greater microstructural transformations.

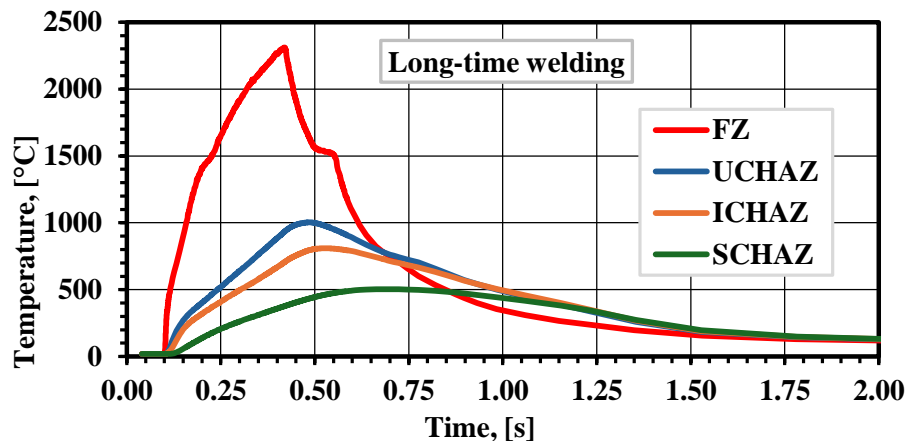


Figure 8. Thermal cycle history of different zones in long-time RSW.

These thermal cycle diagrams can help understand the thermal gradients and cooling rates during different welding processes, which are crucial for predicting the resulting microstructure and mechanical properties of the weld.

The thermal cycle history of the RSW double-pulse and long-time process from the FEM model has been compared with the experimental physical thermal cycle measurement result of the author [32]. A big similarity was found regarding the peak temperatures and cooling rates in the heat affected subzones while the physical measurement of FZ thermal history could not be successful due to severe temperature which the author found difficult to position the thermocouple in FZ. To maintain consistency, the dimensions of the workpiece, material properties, welding conditions, and boundary conditions used were the same as in case of the previous results [32]. It indicates a good agreement between the calculated results and measured data.

4. Conclusion

The two-pulse weld creates distinct thermal cycles, with sharper temperature peaks and faster cooling, which can improve microstructural refinement in the HAZ by repeated heating and solidification. The long-time weld leads to more sustained heat input, promoting broader temperature penetration and potentially larger HAZs. This can result in coarser grains and may affect mechanical properties like ductility and toughness.

The gradient transitions in both simulation images show how heat dissipates through conduction. The sharper gradient in the two-pulse weld suggests faster cooling and localized heat, while the long-time weld shows a more diffused heat distribution.

These simulation results provide valuable insights for understanding how different welding parameters affect the thermal history and resulting microstructure of RSW. The choice between a two-pulse and long-time welding process will depend on the desired mechanical properties and performance of the weld.

References

- [1] S. S. Nayak, Y. Zhou, V. H. Baltazar Hernandez, and E. Biro, “Resistance spot welding of dual-phase steels: heat affected zone softening and tensile properties,” in *Proc. 9th Int. Conf. Trends Weld. Res.*, Chicago, IL, USA, 2012, pp. 641–649.
- [2] C. Rajarajan, P. Sivaraj, and V. Balasubramanian, “Microstructural analysis of weld nugget properties on resistance spot-welded advanced high strength dual phase ($\alpha + \alpha'$) steel joints,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 1, p. 016555, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab654d.
- [3] T. Prehod, V. Rste Preloma, and K. V. Naprednega, “Failure-mode transition in resistance spot welded DP780 advanced high-strength steel: effect of loading conditions,” *Mater. Tehnol.*, vol. 48, no. 1, pp. 67–71, 2014.
- [4] S. A. Jadhav and Venkatesh, “A review paper on optimization of process parameters of spot welding by multi-objective Taguchi,” *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 3, no. 5, pp. 2294–2297, 2016.
- [5] H. L. Jaber, M. Pouranvari, R. K. Salim, F. A. Hashim, and S. P. H. Marashi, “Peak load and energy absorption of DP600 advanced steel resistance spot welds,” *Ironmaking Steelmaking*, vol. 44, no. 9, pp. 699–706, 2017, doi: 10.1080/03019233.2016.1229880.
- [6] X. Wan, Y. Wang, and P. Zhang, “Effects of welding schedules on resistance spot welding of DP600 steel,” *ISIJ Int.*, vol. 54, no. 10, pp. 2375–2379, 2014, doi: 10.2355/isijinternational.54.2375.
- [7] D. W. Zhao, Y. X. Wang, L. Zhang, and P. Zhang, “Effects of electrode force on microstructure and mechanical behavior of the resistance spot welded DP600 joint,” *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 72–77, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.02.016.
- [8] P. Zhang, J. Xie, Y. X. Wang, and J. Q. Chen, “Effects of welding parameters on mechanical properties and microstructure of resistance spot welded DP600 joints,” *Sci. Technol. Weld. Joining*, vol. 16, no. 7, pp. 567–574, 2011, doi: 10.1179/136217110X12813393169732.
- [9] M. Stadler, M. Gruber, R. Schnitzer, and C. Hofer, “Microstructural characterization of a double pulse resistance spot welded 1200 MPa TBF steel,” *Weld. World*, vol. 64, no. 2, pp. 335–343, 2020, doi: 10.1007/s40194-019-00835-9.
- [10] N. Nadimi, M. Pouranvari, R. Ansari, and M. Pouranvari, “Understanding fusion zone hardness in resistance spot welds for advanced high strength steels: strengthening mechanisms and data-driven modeling,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 26, pp. 5549–5565, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.08.251.
- [11] M. Piott, A. Werber, L. Schleuss, N. Doynov, R. Ossenbrink, and V. G. Michailov, “A study of the heat transfer mechanism in resistance spot welding of aluminum alloys AA5182 and

- AA6014,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 1, pp. 263–271, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05650-x.
- [12] M. Tamizi, M. Pouranvari, and M. Movahedi, “The role of HAZ softening on cross-tension mechanical performance of martensitic advanced high strength steel resistance spot welds,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 52, pp. 655–667, 2021, doi: 10.1007/s11661-020-06104-5.
- [13] C. V. Nielsen and W. Zhang, “3D simulation of resistance welding processes and weld strength testing,” in *Simulationsforum 2013: Schweissen und Wärmebehandlung*, 2013.
- [14] A. Chabok, E. Van Der Aa, I. Basu, J. De Hosson, and Y. Pei, “Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel,” *Sci. Technol. Weld. Joining*, vol. 23, no. 8, pp. 649–658, 2018, doi: 10.1080/13621718.2018.1452875.
- [15] I. Khan, M. L. Kuntz, Y. Zhou, K. Chan, and N. Scotchmer, “Monitoring the effect of RSW pulsing on AHSS using FEA (SORPAS) software,” *SAE Tech.*, 2007, Paper 2007-01-1370, doi: 10.4271/2007-01-1370.
- [16] I. A. Soomro, S. R. Pedapati, and M. Awang, “Optimization of postweld tempering pulse parameters for maximum load bearing and failure energy absorption in dual phase (DP590) steel resistance spot welds,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 803, p. 140713, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140713.
- [17] S. Pawar, A. K. Singh, L. Kaushik, K.-S. Park, J. Shim, and S.-H. Choi, “Characterizing local distribution of microstructural features and its correlation with microhardness in resistance spot welded ultra-low-carbon steel: Experimental and finite element characterization,” *Mater. Charact.*, vol. 194, p. 112382, 2022, doi: 10.1016/j.matchar.2022.112382.
- [18] Q. Song, “Testing and modeling of contact problems in resistance welding,” PhD Thesis, Institut for Produktion og Ledelse, Technical University of Denmark, Denmark, 2003. Available on <http://www.ipl.dtu.dk/publikation/7793/dk/>
- [19] H. M. E. Ramos, S. M. O. Tavares, and P. M. S. T. de Castro, “Numerical modelling of welded T-joint configurations using SYSWELD,” *Sci. Technol. Mater.*, vol. 30, pp. 6–15, 2018, doi: 10.1016/j.stmat.2018.08.002.
- [20] T. Dupuy and C. Srikunwong, “Resistance welding numerical simulation: a promising technique,” *Rev. Eur. Éléments*, vol. 13, no. 3-4, pp. 313–341, 2004, doi: 10.3166/reef.13.313-341.
- [21] D. Zhao, Y. Wang, P. Zhang, and D. Liang, „Modeling and experimental research on resistance spot welded joints for dual-phase steel”, *Mater.*, vol. 12, no. 7, 2019. Art. no. 1108, doi: 10.3390/ma12071108.
- [22] M. Eshraghi, M. A. Tschopp, M. Asle Zaem, and S. D. Felicelli, “Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: A parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis,” *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 387–397, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.026.

- [23] F. Mirzaei, H. Ghorbani, and F. Kolahan, “Numerical modeling and optimization of joint strength in resistance spot welding of galvanized steel sheets,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, pp. 3489–3501, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0407-x.
- [24] H. Lebbal, L. Boukhris, H. Berrekia, and A. Ziadi, “Thermomechanical analysis of the resistance spot-welding process,” *Comput. Therm. Sci.*, vol. 10, no. 5, 2018, doi: 10.1615/ComputThermalScien.2018020490.
- [25] P. Govindan and S. Sankar, “Modeling of resistance spot welding process – a review,” *BEST Int. J. Manag. Inf. Technol. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 67–78, 2013.
- [26] Z. Mikno, S. Kowieski, and W. Zhang, “Simulation and optimisation of resistance welding using the SORPAS® software programme,” *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, vol. 60, no. 4, pp. 13–22, 2016, doi: 10.17729/ebis.2016.4/2.
- [27] M. Hamedi and H. Pashazadeh, “Numerical study of nugget formation in resistance spot welding,” *Int. J. Mech.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–15, 2008.
- [28] E. S. I. Group, “Engineering simulation solution for heat treatment, welding and welding assembly, B-SYSWE-02,” Accessed: NOV, 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.esi-group.com>
- [29] D. Lövenborn, “3D FE simulations of resistance spot welding,” Swerea KIMAB-2016-108, Degree Project in Engineering Mechanics, Stockholm, Sweden, 2016.
- [30] E. Feulvarch, V. Robin, and J. M. Bergheau, “Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contact conditions,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153, pp. 436–441, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.096.
- [31] M. Vigneshkumar, P. A. Varthanan, and S. B. Mahandiran, “Experimental investigation and numerical analysis of the effect of process parameters in the resistance spot welding process – A review,” *Int. J. Pure Appl. Math.*, vol. 119, no. 12, pp. 2093–2099, 2018.
- [32] A. Sahm, Á. Meilinger, and M. Gáspár, “Physical heat cycle measurement of resistance spot welding,” *Key Eng. Mater.*, vol. 989, pp. 65–75, 2024, doi: 10.4028/p-Tb0OWj.

A BRIEF REVIEW OF THE RECENT ADVANCES IN NOVEL LASER WELDING TECHNOLOGIES

Raghawendra Pratap Singh Sisodia

Associate professor, University of Miskolc, Institute of Materials Science and Technology,
Faculty of Mechanical Engineering and Informatics
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: raghawendra.sisodia@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Naojainkban a lézersugaras hegesztési technológiák nagyon gyorsan fejlődnek, így az iparágak számára alkalmasak a pontosabb, hatékonyabb és sokoldalúbb termékek gyártására. Az újfajta lézereket például a kék lézert, a zöld lézert, az ultragyors lézert és a szálas lézert alkalmazó hegesztő eljárások, valamint a hibrid lézerhegesztési technológiák bevezetése forradalmasítja a fémek kötés-technológiájának területét. Ezek a fejlesztések jelentősen javítják az energiahatékonyságot és hozzájárulnak a fenntarthatósági célok eléréséhez. Az autóipar, továbbá a nagyobb szilárdságú és jobb alakíthatóságú új acélfajták folyamatos fejlesztése megnövelte az élvonalbeli hegesztési technológiák iránti keresletet. A különböző technológiai fejlesztések, mint például a folyamat-felügyelet, a sugármoduláció és az adaptív vezérlés, javították a hegesztett kötések minőségét, és csökkentették a kihívást jelentő anyagok, a vegyes kötések és a vékony fóliák hegeszthetőségi problémáit. E technológiák folyamatos növekedésével a lézersugaras hegesztés nemcsak a globális ipari jelentőségét bizonyította, hanem azt is, hogy az elkövetkező években további innovációkra van lehetősége. Ezek a vonzó tulajdonságok a lézersugaras hegesztést az Ipar 5.0-hoz való hozzájárulás egyik potenciális eszközévé emelik, amelynek három fő pillére a fenntarthatóság, az ember-központúság és az ellenálló képesség. A lézersugaras hegesztés széleskörűen alkalmazható a különböző iparágakban, többek között a repülőgépiparban, az autóiparban és az elektronikai gyártásban, amelyek máris ezen innovatív technológiák motorjaivá váltak. Ez a közlemény tömör áttekintést nyújt a legújabb fejlesztésekről, az innovációk fő irányaira és a területet ösztönző főbb technológiai áttörésekre összpontosítva.

Kulcsszavak: korszerű lézertechnológiák, hegesztés, hegeszthetőség, fenntarthatóság, korszerű anyagok kötéstechnológiája

Abstract

Currently, laser beam welding (LBW) technologies are evolving very fast, making it suitable for industries to manufacture more precise, efficient, and versatile products. The introduction of novel laser-based welding processes such as blue laser, green laser, ultrafast lasers, fiber lasers, and hybrid laser welding techniques, are revolutionizing the area of metal joining. These advancements significantly improve energy efficiency and contribute to the sustainability goals. The growing automotive industries and continuous development of new types of steel with higher strength and better formability have driven the demand for cutting-edge welding technologies. The various technological advancements, like process monitoring, beam modulation, and adaptive control, have improved the quality of welded joint and reduced the weldability issues of challenging materials,

dissimilar metals, and thin films. With the steady growth of these technologies, LBW has demonstrated not only its global industrial significance but also its potential for further innovation in the coming years. These attractive features make LBW a prospective candidate for contributing to Industry 5.0 which has three main pillars, i.e., sustainability, human-centricity, and resilience. The LBW process has a broad scope of application in different industries, including aerospace, automotive, and electronics manufacturing, which are the sectors that have already become drivers of these innovative technologies. This review provides a concise overview of the most recent developments, zeroing in on the key directions of innovations and major technological breakthroughs stimulating the field.

Keywords: *advanced laser technologies, welding, weldability, sustainability, advanced materials joining*

1. Introduction

The term “laser” is an abbreviation of “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” which describes the physical process of light emission. Laser has its own significance due to its special type of light with high energy than the normal light. It has several peculiar characteristics which make it exceptional for wider applications like monochromaticity with very narrow frequency spectrum, collimated (parallelism), coherence (synchronised phase of light), high intensity etc. [1], [2]. Laser beams wavelengths ranging from infrared to ultraviolet and the wavelength determines the colour and visibility of the laser beam. The laser wavelengths, from shortest to longest, are violet, blue (445 nm, 457 nm, 473 nm), green (515 nm, 532 nm 535 nm), yellow, red, and near-infrared (1064 nm) [1].

The first working laser was developed in the year 1960 by Maiman [3]. The discovery of laser has remarkable achievement in the field of scientific research and its further development contributed its applications in several fields. However, its application in the field of materials processing and manufacturing has greater impact in an environmental protection [2]. Since its inception, laser beam welding (LBW) sets its footstep as a high-quality fusion welding process. There were several types of lasers used in the joining process like gas laser, diode laser, fiber laser, etc. Laser welding provided the benefits through the use of a wide range of parameters which permits for precise control of heat input that was not previously achievable. High-power density laser processing (usually above 10^6 W/cm²), small holes are formed, and the laser beam penetrates through the keyholes. For the low power laser processing, the absorption rate depends upon the laser wavelength. As the wavelength decreases, the absorption rate of non-ferrous metals like aluminium and copper increases. Therefore, it has become an important concern in laser manufacturing of non-ferrous metals to overcome the high laser reflectivity. To address this issue, scientists worked in the advancements of laser technology with short-wavelength lasers. At present, there are blue [4] lasers with a wavelength range of 400–480 nm, as well as green lasers [5] that operate within the 500–560 nm range [6]. These attractive features make LBW a prospective candidate for contributing to Industry 5.0 which has three main pillars, i.e., sustainability, human-centricity, and resilience.

The application of the laser beam welding process is rapidly expanding across various industries, including the automotive and aviation sectors, for the purpose of welding high-strength steels (HSSs) and various nonferrous high-strength alloys. This technology makes the welding of conductive, dissimilar, and reflective materials feasible [7]. Laser welding applications have been reported for various material combinations in many investigations. This welding process is radically different from conventional welding. The ability to achieve high-quality and narrow welds at high production rates makes the laser beam a promising welding technology. The influence of critical processing parameters

usually has a significant impact on the metallurgical characteristics, tensile strength, hardness variation, percentage elongation and residual stress. The process modifications to improve dissimilar laser welding by virtue of techniques such as laser offsetting, split beam, welding-brazing, hybrid welding and materials modifications by means of the introduction of single or multiple interlayers, fillers and pre-cut grooves are exploited [8].

With the development of high strength steels, role of welding technology growing significantly to improve the weldability of these materials to perform intended function at the highest level. Advanced high strength steel and laser beam welding are like two side of a coin, without each other they are incomplete and these combinations becoming so popular nowadays in all industrial application with using all newer laser processes or technology in the field of welding technology [9].

2. Developments in Laser Technologies

There were several types of lasers developed over the period of time. The main types of laser welding technologies based on the types of lasers are solid state laser, gas laser, fiber laser, semiconductor laser, green laser, blue laser etc. The types of lasers and their important characteristics are shown in Table 1.

Table 1. Types of lasers [10]–[13]

Laser		Wavelength [nm]	Oscillation form
Solid-state	YAG	10,600	Continuous wave (CW), Pulse
Gas	CO ₂	10,600	CW, Pulse
Fiber	Yb	975	CW, Ultra-short Pulse
Semiconductor	Diode laser	1070	CW, Pulse
Semiconductor	Blue	400-480	CW, Pulse
Solid-State	Blue	473	CW, Pulse
Solid-State	Green	532	CW, Pulse

2.1. Solid state lasers

The development of new-generation solid-state lasers, such as those based on Nd:YAG, disk, or fiber technology, emitting in the near-infrared range of 1.03-1.07 microns, has significantly increased interest in their application for welding processes. These lasers now achieve continuous wave (CW) powers up to several tens of kW with an exceptional beam quality that approaches the diffraction limit. They also have a very high level of reliability and great efficiency. For these reasons, they have gained popularity as a joining technology when welding a wide variety of materials calls for high performance, high quality, and excellent flexibility [11].

2.2. Gas lasers

The first commercial 100 W CO₂ laser was put on the market in 1966 by Coherent. There is wide use of CO₂ laser in thick plate applications which need high power. However, because of its 10.6 μm wavelength, it cannot be transmitted through optical fibre, which is a drawback [14]. Since it began for commercial purposes, it has undergone continuous development, and at present, average output power

operates up to 60 kW for the materials processing industry [11], [15]. The CO₂ laser has higher absorption of its infrared radiation.

2.3. Fiber lasers

Over the last ten years, there has also been significant development in the design and manufacturing of fibre generators. The compact construction, high wall plugs efficiency, low beam divergence, and ability to concentrate the beam into a very tiny area, even at relatively high power, are other advantages of modern fibre lasers [16]. Also, these fibre lasers have a 20-kW single mode beam capacity and a 100-kW multimode industrial power level. Because of this, lasers are now used for both one-sided and two-sided welding, even on large steel plates that are up to around 30 mm thick [17].

2.4. Semiconductor Laser (Diode laser)

Diode lasers are increasingly used because of their relatively low cost and high energy conservation efficiency. Various materials have been used for diode lasers, and the wavelength of the laser depends on the material, for example, InGaAs (940-990 nm), AlGaAs (720–880 nm), AlGaInP (630–690 nm), and GaN (~445 nm) [6]. Diode laser beam welding is considered as boon in modern industrial application because of its highest reliability, versatility, flexibility, simplicity, highly accurate and efficient process, post application benefits like welded joints exhibit excellent strength with minimal defects, narrow heat affected zone due to lower linear heat input, less distortion, good penetration etc. In recent years, it is widely used in automotive industries to join panels of materials like DP steels etc. which requires higher strength, excellent quality, light weight, passenger safety and cost effectiveness [18]. The development of high-power laser and its successful applications in wider areas have an important impact on medium and heavy industry in near future [9].

2.5. Blue lasers

Blue light lasers (wavelength ~450 nm) have now been developed and much higher energy absorption on highly reflective surfaces [19]. Blue lasers are generated by using a 441.6-nanometer helium-cadmium gas laser and 458, 488-nanometer argon ion lasers. The semiconductor laser used for generating a blue beam is usually made of gallium nitride (GaN, violet) or indium gallium nitride (essentially blue). It is also possible to produce blue lasers using infrared wavelength of semiconductor lasers in combination with a frequency doubler [20]. Blue laser welding can be used for both thermal conduction welding and deep penetration welding, achieving “spatter-free welding” and reducing weld porosity. Besides improving quality, blue laser welding of copper also offers significant speed advantages, being at least five times faster than infrared laser welding. Until a few years ago, the maximum output power of the blue laser was limited to some hundred watts [20]. Meanwhile, recent advancements have enabled a high output power of 1.5 kW, increasing the suitability of this kind of laser for industrial uses [21].

2.6. Green lasers

The green laser has shorter wavelength, approx. 515 nm or 532 nm [1]. It has available up to 3000 W. It is widely used for the micro welding. The main benefits of this laser are less energy, spatter and

pollution which leading to the saving of raw materials and contributing to more sustainable manufacturing.

2.7. Laser arc hybrid welding

Laser arc welding, also known as laser-arc hybrid welding (LAHW), when an electric arc (MAG, TIG, or plasma) with the laser keyhole or material interaction zone created during laser welding (CO₂ or solid-state laser). The initial studies on this method were carried out in the 1970s [22]. However, it become more influencing with the development of higher power lasers. In this process, the advantages of both from laser and arc welding, helping in increased welding productivity [23], [24].

The main advantages of LAHW over the simple arc welding processes are:

- higher productivity due to faster welding speed;
- lower heat input results in reduced thermal distortion in the welded joint;
- less filler material consumption;
- higher penetration depth without edge joint preparation.

The main advantages of LAHW over LBW processes are:

- metallurgical variables controlled through the use of filler materials;
- reduction in the metallurgical defects occurs during the higher cooling rates which avoids hardening behaviour;
- also, requirement for edge positioning accuracy can be reduced.

In the areas of surface treatment and coating applications, hybrid techniques are also being developed to ensure improved functional parameters or the potential to create coatings with distinctive properties [16].

3. Materials compatibility

There are various materials can be welded using various types of laser welding processes in similar materials joint or dissimilar materials joints. It is widely used in modern stainless duplex and super duplex steel, nonferrous metals, and light metals, e.g., titanium and aluminium alloys [17].

4. Emerging Applications

The development of new laser technology and its applications in the field of materials joining process has revolutionized the precision manufacturing. These advancements have expanded scope of laser welding in various fields as mentioned:

- Audi employed a laser hybrid technique to weld the lateral roof frame of its A8 vehicle [25].
- Advanced high strength steels.
- Titanium, Inconel alloys, aluminium alloys etc.
- Microelectronics industry.
- Blue laser applications in electric vehicles parts like weld conductor materials onto battery cell for energy storage applications.
- Blue laser applications in the field of additive manufacturing (Copper, aluminium and its alloys) [1].
- Green laser welding applications in field of very thin copper materials, welding in battery assembly process. Electronics manufacturing [1].

5. Important Standards

During the welding processes, there are various criteria must be considered to achieve good welds, better quality, uniformity, reliability, adherence to safety measures etc. To ensure these objectives, systematic and detailed standards are established by the International Organisation for Standardization (ISO) and other concerned bodies. These standards providing proper guidance for developing welding procedures, ensuring the production of quality products, and addressing the safety concerns related to the equipment and the operators. There are several standards available, covering various aspects of the LBW and some of the important standards are summarised in this paper. ISO 22827 [26], [27] standards for the acceptance tests for Nd:YAG laser beam welding machines and ISO 15616 [28]–[31] standards for the acceptance tests for CO₂-laser beam machines are based on the concept of giving high quality weld by ensuring laser assembly, moving mechanism, measurement of static and dynamic accuracy, calibration of instruments for measurement of gas flow and pressure etc. The terminology, symbols, units of measurement and classification related to the field of laser technology are contains in ISO 11145 [32] standard. The details guidance on materials compatibility, production and process control of welding of metallic materials and also to some extent for non-metallic materials are provided in EN 1011-6 [33] standard. According to this standard, the quality requirement in the LBW is a complex process needing detailed process control and thus the applications has to be controlled at a level compatible with EN ISO 3834 [34]–[38] and the quality requirements for joint geometry and other relevant requirements before the fabrication begin and important conditions for the efficient process controls, the relevant criteria are mentioned in EN ISO 13919 [39], [40]. The specifies requirements for the content of the welding procedure specification (WPS) for laser beam welding processes, including overlay welding are presented in EN 15609-4 [41]. EN ISO 15614-11 [42] specifies how a welding procedure specification for electron or laser beam welding is qualified by a welding procedure test. This standard applies to metallic materials, irrespective of the shape of the parts, their thicknesses, manufacturing method (rolling, forging, casting, sintering, etc.) and their heat treatment. It covers unlimitedly the production of new parts and repair work. This standard is a part of a series of standards, details of this series are given in EN ISO 15607 [43], annex A. The general guidance for laser beam welding of metallic materials in all forms (e.g. cast, wrought, extruded, forged), and associated processes are provided in ISO/TR 17671-6 [44] standard. The preparation of welding procedure specifications (WPS) for laser arc hybrid welding (LAHW), including guidelines for joint preparation, welding parameters, and equipment, is outlined in the EN 15609-6 [45] standard. The qualification of welding procedures for LAHW are presented in EN ISO 15614-14 [46] which also includes material compatibility, welding setup, and inspection requirements. ISO 23493 [47] standard outlines the equipment and operator qualification needed for LAHW, and recommends butt, fillet and flange joint preparations and consumables suitable for use with this process. It gives the overview of the sequences consider during equipment set-up, procedure specification, workpiece set-up immediately prior to welding, and after welding once inspecting and testing the welds. This standard applies to LAHW of steels, aluminium and its alloys. This standard does not apply to hybrid processes where LBW is hybridized with another welding process not using an electric arc as its heat source. The requirements for welding operators are also mentioned in the standard. EN 14732 [48] and also weld setters for mechanized and automatic welding. This standard gives the basis for mutual recognition through examining organizations for approval of welding operator competence in the diverse fields of applications. However, national standards are also important for the development of LBW process. One of the important standards is from the American Welding Society (AWS) that is

C7.2 [49]. The safety requirements relating to laser radiation hazards in laser processing machines and also the machine and operator safety during laser welding are outlined in the EN 11553 [50], [51] standard to ensure against potential risks associated with it. EN ISO 4063 [52] establishes a nomenclature for welding processes and LBW designates with reference number 52. ISO/TR 25901 [53] includes general terms and definitions applicable to welding and allied processes.

6. Conclusion

The concise and informative review on the recent advancements in laser beam technologies, including the basics, types of lasers, joining processes using different laser types, materials applications, etc., is based on the author's own experience and other literature available. LBW provides precise and better quality, ensuring consistent welding penetration depth. Also, LBW processes have a smaller heat-affected zone, which helps reduce deformation, making them suitable for thin plate welding and micro-welding. This review also summarises the important standards specifically important to the laser beam welding processes. The expanding field, such as electric vehicles, is experiencing a surge in demand for copper and other high-reflective materials, and green and blue lasers are providing superior joining solutions. So, it can be concluded that the current revolution in the development of innovative and precise lasers will contribute to the more advanced and state-of-the-art applications in the field of welding technologies and surface treatment for the joining of advanced and dissimilar materials in industrial applications.

References

- [1] Q. Yang, P. Zhang, Q. Lu, H. Yan, H. Shi, Z. Yu, T. Sun, R. Li, Q. Wang, Y. Wu, J. Chen, "Application and development of blue and green laser in industrial manufacturing: A review", *Opt. Laser Technol.*, vol. 170, 2024, 110202. doi:10.1016/j.optlastec.2023.110202.
- [2] C.P. Bergmann, S. Katayama, Topics in mining, metallurgy and materials engineering series editor: fundamentals and details of laser welding.
- [3] T.H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby", *Nature*. vol. 187, 4736, pp. 493–494, 1960.
- [4] J. Pelaprat, M. Finuf, R. Gleeson, M. Zediker, "Blue Lasers Move Deeper Into Applications," *PhotonicsViews*, vol. 17, pp. 41–45, 2020. doi:10.1002/phvs.202000032.
- [5] A. Singh, L. Caprio, B. Previtali, A.G. Demir, "Processability of pure Cu by LPBF using a ns-pulsed green fiber laser", *Opt. Laser Technol.*, vol. 154, 2022. doi:10.1016/j.optlastec.2022.108310.
- [6] H. Wang, Y. Kawahito, R. Yoshida, Y. Nakashima, K. Shiokawa, "Development of a high-power blue laser (445 nm) for material processing", *Opt. Lett.*, vol. 42, 2251, 2017. doi:10.1364/ol.42.002251.
- [7] S. Katayama, *Fundamentals and Details of Laser Welding*, 2020.
- [8] M.M. Quazi, M. Ishak, M.A. Fazal, A. Arslan, S. Rubaiee, A. Qaban, M.H. Aiman, T. Sultan, M.M. Ali, S.M. Manladan, "Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys", *Opt. Laser Technol.* vol. 126, 106090, 2020. doi:10.1016/j.optlastec.2020.106090.
- [9] R.P.S. Sisodia, M. Gáspár, B. Fodor, L. Draskóczy, "Simulation and Experimental Based Analysis of the Laser Beam Welding of DP Steels," *Adv. Mater. Res.*, vol. 73–82, 1157, 2020. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1157.73.

- [10] J. M. Pelaprat, M. Finuf, R. Fritz, M. Zediker, "Seeing Things in a New Light," *Laser Tech. J.* vol. 15, pp. 39–41, 2018. doi:10.1002/latj.201800028.
- [11] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*, 2013.
- [12] C. Veilleux, *Laser Welding Copper: Fiber, Blue, or Green Lasers?*.
<https://www.laserax.com/blog/laser-welding-copper> (accessed December 11, 2024).
- [13] T. Jüstel, *Types of Blue Lasers Applications of Blue and Violet Lasers*, Photonics.
https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Blue_and_Violet_Lasers.pdf (accessed December 11, 2024).
- [14] W. I. Cho, S. J. Na, "Impact of Wavelengths of CO₂, Disk, and Green Lasers on Fusion Zone Shape in Laser Welding of Steel", *J. Weld. Join.*, vol. 38, pp. 235–240, 2020. doi:10.5781/jwj.2020.38.3.1.
- [15] A. DeMaria, T. Hennessey, "The CO₂ Laser: The Workhorse of the Laser Material Processing Industry," *SPIE Prof.*, vol. 88, pp. 130–149, 2010. <http://www.spie.org/x38563.xml>.
- [16] A. Lisiecki, D. Ślizak, "Hybrid laser deposition of fe-based metallic powder under cryogenic conditions," *Metals*, vol.10, pp. 1–20, 2020. doi:10.3390/met10020190.
- [17] A. Lisiecki, "Development of Laser Welding and Surface Treatment of Metals," *Materials*, vol. 15, 2022. doi:10.3390/ma15051765.
- [18] K. Parker, *Welding with High Power Diode Lasers*.
https://www.photonics.com/images/Web/WhitePapers/372/Welding_with_High_Power_Diode_Lasers.pdf (accessed December 8, 2024).
- [19] J. Zhou, G. Xia, Z. Zhou, C. Chen, Y. Long, "Comparison study of 6082 Al alloy laser welding using 455 nm blue laser and 1080 nm near-infrared laser," *Optik (Stuttg)*, vol. 272, 170224, 2023. doi:10.1016/j.ijleo.2022.170224.
- [20] S. Engler, R. Ramsayer, R. Poprawe, "Process studies on laser welding of copper with brilliant green and infrared lasers," *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 339–346, 2011. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.142.
- [21] M. Baumann, M. Ackermann, A. Balck, T. Bonhoff, O. Botter, R. Lange, S. Marfels, D. Dinakaran, A. Kösters, V. Krause, B. Emde, S. Zimbelmann, J. Hermsdorf, S. Kaielerle, T. Heusinger von Waldege, "4XX nm diode-laser beyond 2 kW of output power", in: M.S. Zediker, E.P. Zucker (Eds.), *High-Power Diode Laser Technol. XX*, SPIE, 2022: p. 32. doi:10.1117/12.2615623.
- [22] J. Eboo, M., Steen, W.M., Clark, *Arc-augmented laser welding.*, in: *Proc. 4th Int. Conf. Adv. Weld. Process*, United Kingdom, pp. 257–265, 1978.
- [23] E. Vaamonde Couso, J. Vázquez Gómez, "Laser Beam Welding and Automotive Engineering," pp. 59–84, 2010. doi:10.1007/8611_2011_57.
- [24] F O Olsen, *Hybrid Laser-Arc Welding*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.
- [25] G. Staufer, H., Rührnöbl, M., Miessbacher, "Laser hybrid welding and laser brazing: State of the art in technology and practice by the examples of the Audi A8 and VW-Phaeton," Fronius Internacional GMBH, Wels, Austria.
- [26] *Acceptance tests for Nd:YAG laser beam welding machines — Machines with optical fibre delivery Part 1: Laser assembly*, ISO 22827-1, 2005.
- [27] *Acceptance tests for Nd:YAG laser beam welding machines — Machines with optical fibre delivery Part 2: Moving mechanism*, ISO 22827-2, 2005.
- [28] *Acceptance tests for CO₂-laser beam machines for high quality welding and cutting Part 1:*

- General principles, acceptance conditions*, ISO 15616-1, 2003.
- [29] *Acceptance tests for CO₂-laser beam machines for high quality welding and cutting Part 2: Measurement of static and dynamic accuracy*, ISO 15616-2, 2003.
- [30] *Acceptance tests for CO₂-laser beam machines for high quality welding and cutting Part 3: Calibration of instruments for measurement of gas flow and pressure*, ISO 15616-3, 2003.
- [31] *Acceptance tests for CO₂-laser beam machines for high quality welding and cutting Part 4: Machines with 2-D moving optics*, ISO 15616-4, 2008.
- [32] *Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Vocabulary and symbols*, EN ISO 11145, 2018.
- [33] *Welding - Recommendation for welding of metallic materials — Part 6: Laser beam welding*, EN 1011-6, 2018.
- [34] *Quality requirements for fusion welding of metallic materials Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements*, EN ISO 3834-1, 2021.
- [35] *Quality requirements for fusion welding of metallic materials — Part 2: Comprehensive quality requirements*, EN ISO 3834-2, 2021.
- [36] *Quality requirements for fusion welding of metallic materials — Part 3: Standard quality requirements*, EN ISO 3834-3, 2021.
- [37] *Quality requirements for fusion welding of metallic materials — Part 4: Elementary quality requirements*, ISO 3834-4, 2021.
- [38] *Quality requirements for fusion welding of metallic materials — Part 5: Documents with which it is necessary to conform to claim conformity to the quality requirements of ISO 3834-2, ISO 3834-3 or ISO 3834-4*, EN ISO 3834-5, 2021.
- [39] *Electron and laser-beam welded joints — Requirements and recommendations on quality levels for imperfections Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys*, EN ISO 13919-1, 2019.
- [40] *Electron and laser-beam welded joints — Requirements and recommendations on quality levels for imperfections Part 2: Aluminium, magnesium and their alloys and pure copper*, EN ISO 13919-2, 2021.
- [41] *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure specification — Part 4: Laser beam welding*, EN ISO 15609-4, 2009.
- [42] *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test Part 11: Electron and laser beam welding*, EN ISO 15614-11, 2002.
- [43] *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — General rules*, EN ISO 15607, 2019.
- [44] *Welding — Recommendations for welding of metallic materials — Part 6: Laser beam welding*, ISO/TR 17671-6, 2005.
- [45] *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure specification — Part 6: Laser-arc hybrid welding*, ISO 15609-6, 2013.
- [46] *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 14: Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys*, ISO 15614-14, 2013.
- [47] *Welding and allied processes — Process specification for laser-arc hybrid welding for metallic materials*, ISO 23493, 2020.
- [48] *Welding personnel — Qualification testing of welding operators and weld setters for mechanized and automatic welding of metallic materials*, EN ISO 14732, 2013.
- [49] *Recommended practices for laser beam welding, cutting, and drilling*, AWS - C7.2, 2010.

- [50] *Safety of machinery — Laser processing machines Part 1: Laser safety requirements*, ISO 11553-1, 2020.
- [51] *Safety of machinery — Laser processing machines Part 2: Safety requirements for hand-held or hand-operated laser processing machines*, ISO 11553-2, 2007.
- [52] *Welding, brazing, soldering and cutting — Nomenclature of processes and reference numbers*, EN ISO 4063, 2023.
- [53] *Welding and allied processes — Vocabulary Part 1: General terms*, ISO/TR 25901-1, 2016.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NORMAL AND OSCILLATION LASER BEAM WELDING OF 1400M STEEL

Raghawendra Pratap Singh Sisodia

Associate professor, University of Miskolc, Institute of Materials Science and Technology,
Faculty of Mechanical Engineering and Informatics
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: raghawendra.sisodia@uni-miskolc.hu

Ferenc Hareancz

Assistant lecturer, John von Neumann University, Department of Innovative Vehicles and Materials,
GAMF Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science
6000 Kecskemét, Izsáki Street 10, e-mail: hareancz.ferenc@nje.hu

Ferenc Tajti

Assistant lecturer, John von Neumann University, Department of Innovative Vehicles and Materials,
GAMF Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science
6000 Kecskemét, Izsáki Street 10, e-mail: tajti.ferenc@nje.hu

Absztrakt

A nagyszilárdságú autóiipari acélok gyártása megköveteli az összekötésükhöz szükséges korszerű hegesztési eljárások kifejlesztését. Mivel az autóiiparban való felhasználásukhoz egyre fontosabbá válik ezen acélok hegeszthetőségének vizsgálata, a lézersugaras hegesztés az egyik legfejlettebb és legsokoldalúbb eljárássá vált. A különböző típusú lézerekkel mind a vékony-, mind pedig a vastaglemezek hatékonyan hegeszthetők. Lézersugaras hegesztés alkalmazásával a vékonylemezek hegesztése kis vonalenergiával valósítható meg, ami keskeny varratot, kisebb maradó alakváltozást és nagyobb termelékenységet eredményez az ívhegesztési eljárásokhoz képest. Az autóiiparban az olyan rugalmasságot biztosító hegesztéstechnológiák, mint a lézersugaras hegesztés bizonyult a leghatékonyabbnak a kívánt minőség és teljesítmény eléréséhez. Az autók karosszériájának szerkezeti elemeihez széles körben alkalmaznak 1400 MPa szilárdsági kategóriájú martenzites acélt (MS) a különböző alkatrészekenél. A nagyszilárdságú acélok hegesztése továbbra is problémás a hegesztett kötés hőhatás-övezetében bekövetkező keményedés és kilágyulás miatt. A lézersugár oszcillációjának mintázata hatékonyan befolyásolja az anyagáramlást, elősegítve a hegesztési hibák számának csökkenését és a szemcsefinomodást stb. Ebben a tanulmányban 1 mm vastagságú, 1400M acéllemezek lézersugaras hegesztett kötéseinek mechanikai tulajdonságait és mikroszerkezeti jellemzőit vizsgáltuk a hagyományos lézersugaras technológia és az oszcillációs technika összehasonlításával. A mikroszerkezeti elemzés martenzites szövetszerkezetet mutatott a varratban és a hőhatásövezetben egyaránt. A hagyományos és cikcakk oszcillációval előállított varrat mikrokeménysége 395 ± 16 és 405 ± 16 HV_{0,2} volt. A sugároszcillációval készített hegesztett kötések átlagos szakítószilárdsága 1013 MPa értékre adódott. A hajlítóvizsgálat vegyes rideg-képlékeny tönkremenetelt mutatott.

Kulcsszavak: diszk lézeres hegesztés, martenzites acél (MS), cikcakkos sugár oszcilláció, mikroszerkezeti jellemzés, mechanikai tulajdonságok

Abstract

The production of high-strength automotive steels necessitates the development of advanced welding processes for their joining. Due to the increasing importance of studying the weldability of these steels for their intended use in the automotive sector, laser beam welding (LBW) has emerged as one of the most sophisticated and versatile processes. It is effective for joining very thin sheets to thicker plates by employing different types of LBW processes. The LBW process has significant capability to weld thin sheet metal with lower linear energy resulting narrow weld, lower deformation with higher productivity as compared to arc welding processes. However, flexible welding technology, such as the LBW process, has proven to be the most effective in the automotive manufacturing industry for achieving the desired quality and output. The car body's structural components widely employ martensitic steel (MS) with a strength grade of 1400 MPa for various parts. Furthermore, welding of high-strength steels (HSSs) remains difficult due to hardening and softening behavior in the heat affected zone (HAZ) of the welded joint. However, beam oscillation patterns provide the driven force with unique and additional features of material flow dynamics, which minimize weld defects, promote grain refinement, etc. This paper compared the normal LBW process with a beam oscillated LBW process, analyzing their effects on the mechanical properties and microstructural characteristics of disk laser-welded 1400M steel joints with a thickness of 1 mm. Microstructural analysis showed martensite structure prevalent in the fusion zone (FZ) and HAZ. The microhardness of the weld produced using normal and zigzag oscillation modes was 395 ± 16 and 405 ± 16 HV0.2 respectively. The average tensile strength of the welded joints subjected to the beam oscillation was 1013 MPa. The bendability test revealed a mixed result of brittle and ductile failure. The FZ of both normal LBW and zigzag oscillation LBW joints exhibits larger impact toughness than the BM.

Keywords: disk laser beam welding (DLBW); martensitic steel (MS); zigzag beam oscillation; microstructural characterization; mechanical properties

1. Introduction

In recent years, there has been a huge demand for lightweight materials like advanced high strength steels (AHSS) in the automotive industry, especially with higher strength and better formability. Since the development of several types of cars with various fuel-propelled systems (electric, battery, hydrogen, etc.), there has been a growing need for lighter bodies that combine safety, low fuel consumption, and longer mileage [1], [2]. The most effective technique to improve fuel efficiency without sacrificing performance is to reduce a vehicle's overall weight. The overall weight reduction in the automotive body has focused on considering environmental regulations related to CO₂ emissions reduction, etc. The development of AHSSs for automotive steels has been taken over several decades in several stages like 1st generation, 2nd generation, 3rd generations steels etc.

The main HSS groups used today in the automotive industry are complex phase (CP) steels, martensitic (MS) steels, ferritic-bainitic (FB) steels, dual phase (DP) steels, transformation induced plasticity (TRIP) steels, hot-formed (HF) and twinning induced plasticity (TWIP) steels etc. In this paper, Docol 1400M steel was used for the study. The microstructure of this steel is primarily composed of martensite in a ferrite matrix. The SSAB company produces the martensitic HSSs under the brand name Docol[®] steel, which have an ultimate tensile strength of 900 MPa to 1700 MPa and a carbon content of 0.08% to 0.35% respectively [3], [4]. Martensitic steels have higher strength with improved ductility and can be used for more optimized design profiles, which are significantly more

cost-effective than aluminum. The main application of this steel is in car body components like bumpers, roof reinforcements, seat structures, electric vehicle (EV) battery protection, etc. [5].

Figure 1. shows the grouping of traditional and advanced high-strength steels, which typically falls into the category of thin plates. The diagram represents the tensile strength and percent elongation of different steel grades. The figure illustrates that the individual categories cannot be separated from each other strictly, only with overlaps. It can also be observed that each group is located along three characteristic curves ($R_m \times A_5 = k_m$), where R_m = ultimate tensile strength, A_5 = percent elongation, and their characteristic values k_m is called the material constant [6].

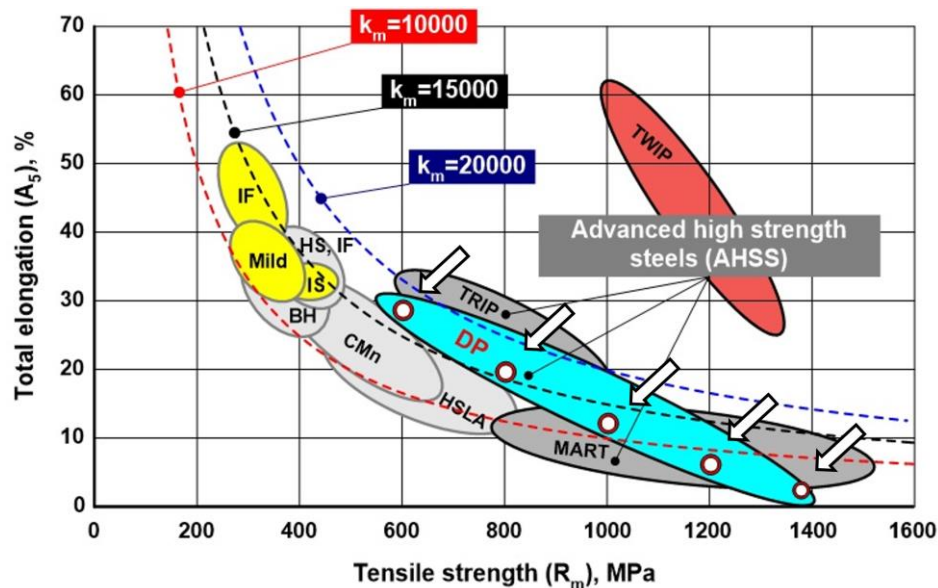


Figure 1. Advanced high strength steels, tensile strength vs total elongation [6], [7].

Due to the advancement of HSS, the importance of welding technology in enhancing the weldability of these materials to fulfil intended functions at the highest possible level has grown significantly. Since then, the weldability of these steels has remained a major concern due to their complex multiphase microstructure. For considering to increase the strength level, the carbon content and other microalloying elements also increase in HSSs.

Welding technology is the most widely and commonly used process in the automobile industry for joining different components of the vehicle body. In the automotive sector, the use of the laser beam welding technique for HSS welding, which is fundamentally different from traditional welding procedures, is rapidly increasing [8], [9]. The LBW technique with various types of lasers like diode lasers, LD-pumped solid state lasers, CO₂ lasers, Nd:YAG lasers, fiber lasers, etc. has more wider-ranging applications [10], [11]. LBW is a highly precise and efficient welding technique with high welding speed, low linear energy, a narrow weld and heat affected zone, low distortion etc. [12], [13]. The high-power density of the laser beam and low beam spot size give an added advantage of high penetration depth and low, precise, and controllable heat input [14]. Laser technology is widely used in the vehicle manufacturing sector to increase productivity, improve quality, reliability etc. [15]. Aleksander [14] mentioned in his study the wide and valuable information about the development of laser welding and the application of lasers in various industrial applications, including the surface

treatment of metals. Ashok et al. [16] elucidated the state of the art of weldability on AHSS with an ultimate strength level above 800 MPa in their study. Also, the effects of alloy designs on the HAZ softening, microstructure evolution, and mechanical properties of the weld joints correspond to different welding techniques and filler wire. Eva et al [17] in their study related to the quality assessment of laser welding of dual phase steels specified the special attention required during welding of butt joint, which is the most widely used joint type. The special attention required for proper alignment and gap between the sheets to be welded since it may cause instability in the weld and may result in some defects such as weld concavity, undercut, and the appearance of a notch that increases fatigue in parts [17]. The higher cooling rate of the weld during the LBW process may result in a large amount of martensitic structure in the fusion zone (FZ) and coarse-grained heat affected zone (CGHAZ), which also causes an increase in hardness that makes it more susceptible to cracking and also results in residual stresses in the welded joint. However, previous studies [18] showed also a significant softening in the HAZ of a laser welded joint due to the tempering of the pre-existing martensite in the DP steels.

Therefore, the beam oscillating patterns of laser welding are a potential method to improve the weld morphologies, which may enhance weld quality by decreasing porosity and improving penetration depth. Furthermore, oscillation may have a stirring action in the molten pool, which promotes mixing and reduces the risk of solidification cracking. The research showed that oscillation of the laser beam improved the stability of the LBW process [19]. Kris et al. [19] mention that, in comparison to non-oscillating laser welding, the oscillation of the laser beam requires essentially no change in welding speed to obtain the same penetration. This helps with the more efficient use of available energy. In the case of full penetration, there is always a loss of energy through the plates during welding without oscillation for thin sheet combinations in butt joint arrangements. Moreover, with oscillation, energy loss is less, and the process is more efficient. There are different types of beam oscillation modes (circular, helical, zigzag, etc.) that can be used with the LBW process. One of them is the zigzag oscillation method. Zigzag beam oscillation is a technique that involves moving the laser beam back and forth in a controlled manner during welding. This technique has been shown to have several potential benefits in the laser welding of HSSs. Oscillation can increase penetration depth by creating a keyhole that is wider and deeper than in a normal LBW process. The oscillation causes the laser beam to scan across the workpiece, melting a larger area and increasing the size of the keyhole. This deeper penetration can lead to stronger and more reliable welds.

The main objective of this study is to characterize the disc laser welded martensitic 1400M steel joint using the normal disc laser welding process with zigzag beam oscillation in order to understand and compare the microstructural and mechanical properties of the weldments.

2. Material and experimental procedure

2.1. Investigated material

The base material used in this paper was uncoated, cold-rolled martensitic 1400M advanced high strength steels in 1 mm thickness for the study of the effect of laser beam oscillation. The chemical composition (analyzed in laboratory, University of Miskolc) and mechanical properties (measured in the laboratory, University of Miskolc) of the used base material are presented in Table 1 and Table 2, respectively. Based on the data in Table 1, the calculated carbon equivalent (CEV) for the martensitic 1400M steel according to standard EN 1011-2 [20] as 0.69.

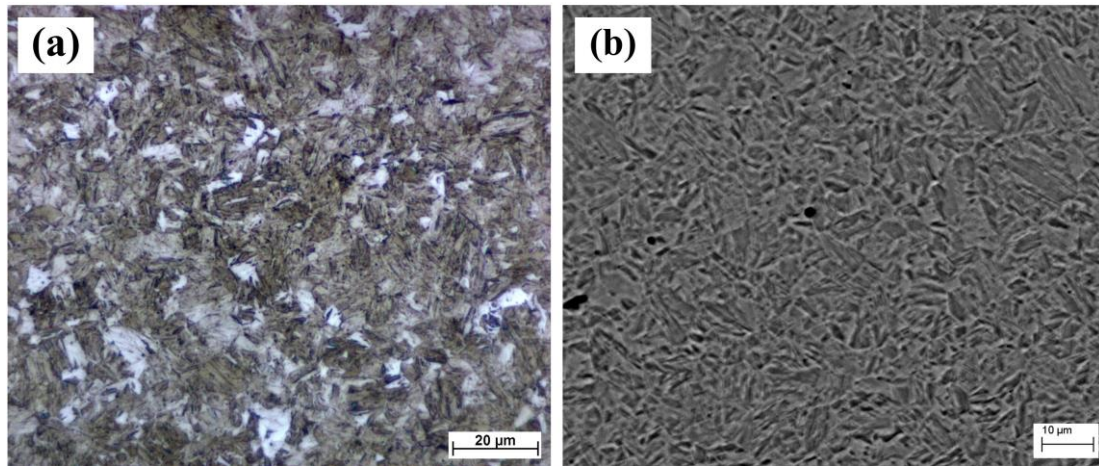
Table 1. Chemical composition of base material [weight%]

Steel	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	P	S
MS1400	0.22	0.46	2.64	0.03	0.12	0.004	0.023	0.03	0.214	0.037	0.016	0.003

Table 2. Mechanical properties of the investigated 1400M steel

Steel	CEV	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
MS1400	0.69	1391	1496	4.5

The optical microscopic (OM) and scanning electron microscope (SEM) images of the investigated base material microstructure are shown in Figure 2(a) and (b) respectively. The microstructure basically consists of martensite and some amount of ferrite.

**Figure 2.** Base material microstructure (1400M); (a) OM, M= 1000×, (b) SEM, M= 2500×.

2.2. Disk laser welding

The laser beam welding was performed at the Department of Innovative Vehicles and Materials, John von Neumann University, Kecskemét, Hungary, by using a disk laser, TruLaser 4001 (Trumpf Laser GmbH) with a maximum power of 4 kW and beam parameter product (BPP) of 19.174 mm mrad and a wavelength of 1.03 μm . The samples were cut into two pieces with a size of 350 \times 150 mm for a butt weld joint according to EN 15614-11 [21]. Before the welding, the sheets joint edges and surfaces were properly cleaned with acetone, and to prevent distortion and provide proper alignment for joints, the sheets were clamped in the fixture. The focusing optic was an MSO100 moved by an NC machine. The laser system was the TruLaser Cell 7020. The laser welding head (focusing optics) was equipped with a 200 mm focusing lens. A dual core laser light cable guides the light to the processing head with a core diameter of 100 μm and a mantle diameter of 400 μm . The normal and zig-zag oscillation LBW was operated in continuous wave (CW) and zigzag mode, respectively and the power output stability under the rated power was $\pm 1\%$. The diameter of the laser beam in focus was 464 μm . During the welding experiment, the workpiece was fixed rigidly by the clamps, and the welding head moved towards the welding direction. The laser power and welding speed for both techniques were kept as

900 W and 0.73 m/min, respectively. The 99.996% pure argon (Argon 4.6) gas was used for shielding on both the face side and root side of the joint at a rate of 22 l/min and 10 l/min, respectively. The weld beam angle was perpendicular to the workpiece, and the nozzle to workpiece distance was 30 mm. The experimental set-up for the disk LBW process and welded joint is shown in Figure 3(a) and (b), respectively.

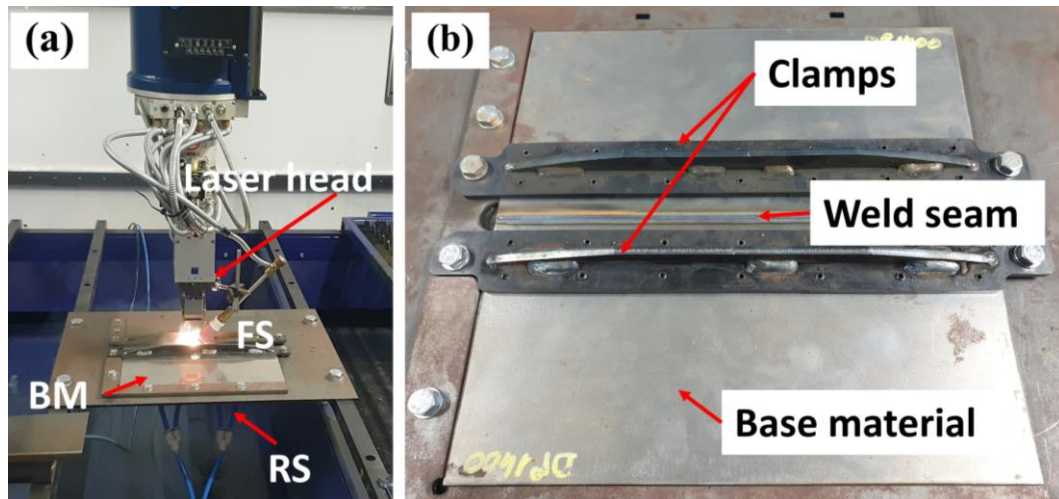


Figure 3. LBW process; (BM - base material; FS - face shielding; RS - root shielding); (a) experimental set-up (b) welded joint.

The zigzag beam oscillation with fillet was used for welding to compare with the normal LBW process; the seam width was 0.75 mm (Figure 4).

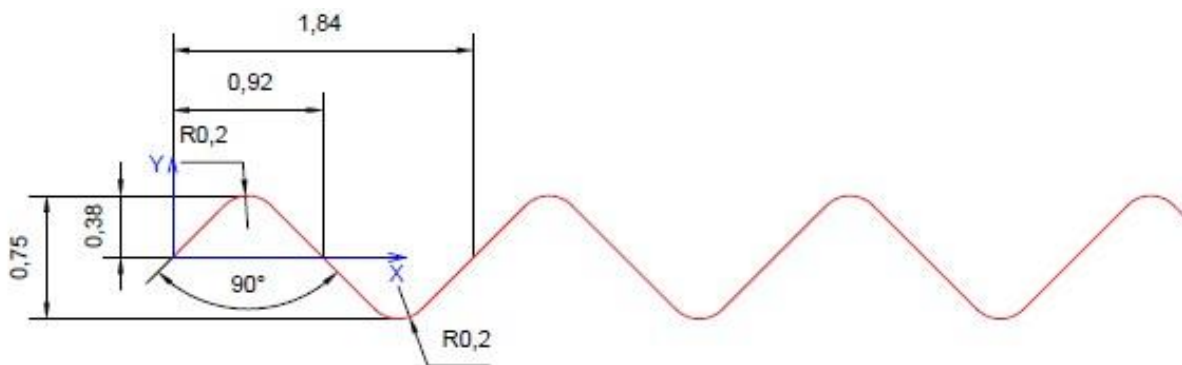


Figure 4. Schematic of the zigzag beam oscillation.

The weld seam profile of the normal LBW process and with zigzag beam oscillation are shown in Figure 5(a) and (b) respectively.

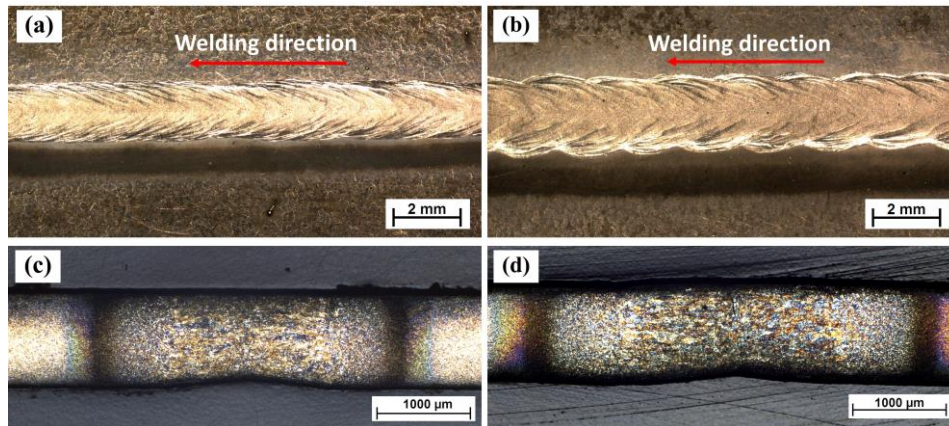


Figure 5. Weld surface morphology of joint; (a) normal LBW, (b) zigzag oscillation; transverse cross section (c) normal LBW, (d) zigzag oscillation.

2.3. Evaluation approach

To study and analyze the comparison of the normal LBW process and the effect of zigzag beam oscillation on the joint, microstructural and mechanical tests were performed. The metallographic, hardness, tensile, and bending specimens were cut along the direction perpendicular to the weld seam. The microstructure of the welded joints was analyzed using an optical microscope (Axio Observer D1m) and scanning electron microscope (ZEISS Sigma 300 VP). The metallographic specimens were polished with 120#, 400#, 800#, and 1500# metallographic sandpaper in turns, and then the specimens were mechanically polished to obtain a glossy mirror surface. The surface of each specimen was etched using a solution of 2% Nital to reveal the microstructure of the BM, FZ, and HAZ.

The Vickers microhardness test (Mitutoyo microhardness tester) (ISO 9015-2 [22]) was performed on the etched transverse cross sections with a load of 200 g for a 15 s dwell time. The tensile tests (ISO 4136 [23]) were performed on MTS 322 load frame and three-point bending test (ISO 5173 [24]) was evaluated on the MTS 311 at room temperature. The instrumented Charpy V-notch impact tests were conducted using Heckert impact testing equipment equipped with a digital signal oscilloscope and a data acquisitions system.

3. Results and discussions

3.1. Microstructural results

The microstructural examination has been performed using SEM. The occurrence of different heat cycles throughout the weldment and the formation of several metallurgically transformed zones, particularly the HAZ and FZ, occurred during the LBW process, followed by solidification on fast cooling. The BM microstructure of the as-received 1400M predominantly consists of martensite and some ferrite. The microstructure of FZ and different subzones of HAZ, i.e., coarse-grained heat affected zone (CGHAZ), intercritical heat affected zone (ICHAZ), fine-grained heat affected zone (FGHAZ) for both normal LB-weld and zigzag beam oscillation welding are shown in Figure 6 and Figure 7, respectively. FZ of normal LBW has coarse martensite while that of oscillated LBW has little refined grain size compared normal LBW.

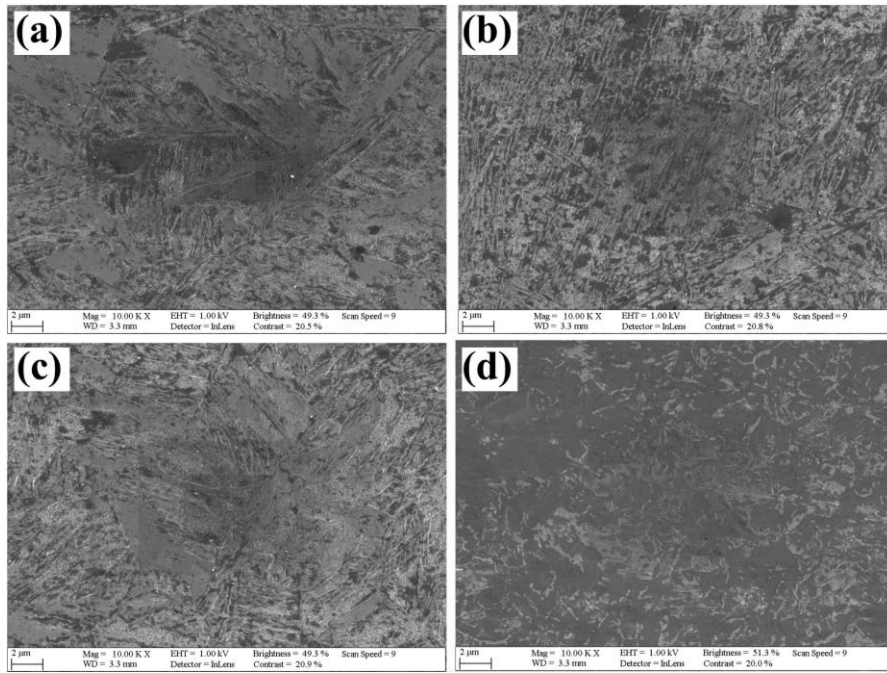


Figure 6. Microstructure of 1400M steel in different regions of the normal laser beam weld, a) fusion zone, (b) CGHAZ, (c) FGHAZ, and (d) ICHAZ.

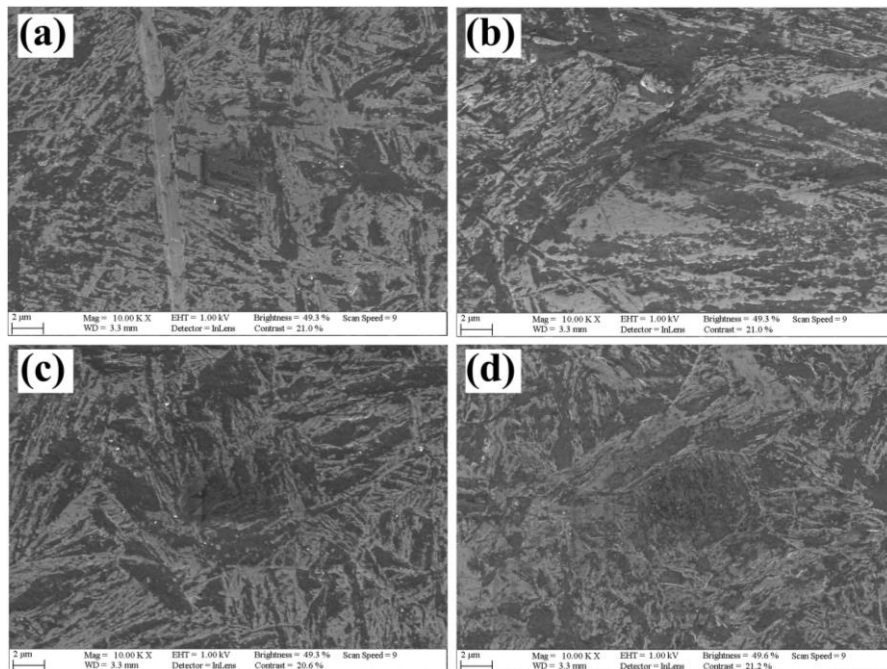


Figure 7. Microstructure of 1400M steel in different regions of the zigzag beam oscillation laser weld, (a) fusion zone, (b) CGHAZ, (c) FGHAZ, and (d) ICHAZ.

In the CGHAZ of normal LBW, the martensite is dominant and larger in size compared to zigzag oscillated beam welded. With the zigzag beam oscillation, in CGHAZ, martensite grains appear to be finer and more evenly distributed which contributed to toughness improvement and reduction in brittleness. ICHAZ of normal LBW showed coarser martensite structure compared to the zigzag oscillation LBW.

3.2. Microhardness results

Vickers microhardness testing was conducted on etched samples at a load of 200 g, using a dwell time of 15 s. The measurement was taken across the middle of the transverse cross section. The indentation points were adequately spaced, and the distance between them was 0.1 mm. Figure 8 shows the microhardness comparison between the normal LBW joint and the beam oscillation joint.

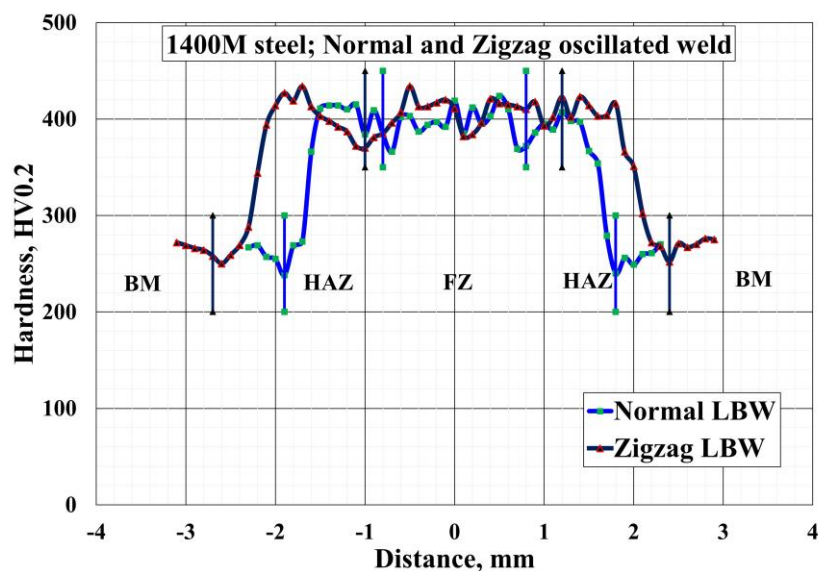


Figure 8. Microhardness graph for LBW and zigzag beam oscillation welded joint.

The BM hardness was measured as 272 ± 3 HV0.2. Relative to the BM, the formation of more martensite in the weldment caused an increase in hardness in the FZ and HAZ, as seen in Figure 8. The average hardness values measured in FZ and HAZ for a normal LBW joint are 395 ± 16 HV0.2 and 364 ± 65 HV0.2 respectively; for a beam oscillation welded joint, the average hardness values measured in FZ and HAZ are 405 ± 16 HV0.2 and 366 ± 62 HV0.2, respectively. The maximum or peak hardness in a normal LBW welded joint and a beam oscillation welded joint was observed as 424 HV0.2 and 434 HV0.2 in HAZ and FZ, respectively. The peak hardness in HAZ during normal LBW process is attributed to the transformation of the austenite phase (which formed due to high temperature) into martensite due to rapid cooling. Also, the high carbon content of martensite and carbide formation due to a faster cooling rate also contributed to the hardness increase. The higher hardness was observed in FZ for both normal LBW joints and beam oscillation joints compared to HAZ, which was attributed to the higher temperature experienced by martensitic steel in FZ. This leads to high localized changes in the homogenized microstructure, mainly composed of martensite. The zigzag beam oscillation joint

showed comparatively more hardness compared to the normal laser welded joint for both FZ and HAZ. Moving away in the HAZ, especially from inter ICHAZ to SCHAZ, a sharp reduction in the hardness was observed. Figure 8 shows the hardness drop below the BM value at the boundary of the BM-HAZ zone, which clearly depicts the softening behavior in SCHAZ for both the normal LBW joint and the beam oscillation joint. However, the level of softening in SCHAZ for the normal LBW joint was higher than that in the beam oscillation joint. This softening is caused by the tempering of pre-existing martensite present in the sub critical area of HAZ [25].

3.3. Tensile test results

The transverse (perpendicular to the welding direction) tensile tests were performed according to the EN ISO 4136 [23] standard on normal LBW and zigzag beam oscillation welded specimens. Tensile test specimens have been prepared from butt-welded joints. The tensile test was carried out at room temperature using the MTS 322 tensile testing machine to determine the ultimate tensile strength of all welded specimens. The specimens were milled and etched in order to observe the FZ and HAZ from the welded sheets and the fracture along the welded specimens. The tensile test was performed at a rate of 0.2 mm/s. The comparative transverse tensile test results of normal LBW and beam oscillation weld joints are presented in Table 3.

Table 3. Transverse tensile test results of as-welded joints specimens

Process	Sample No.	Fracture location	Tensile strength [MPa]	Average tensile strength [MPa]
Normal LBW	1a	HAZ	1057	1060
	1b	HAZ	1063	
Beam oscillated LBW	2a	HAZ	1017	1013
	2b	HAZ	1009	

The results show a decrease in the tensile strength in both the normal laser beam welded joint and the beam oscillation joint. The BM tensile strength measured in the laboratory was 1496 MPa. However, the reduction in strength in a normal laser welded joint was about 41% and in a beam oscillation joint, it was 48%. The difference in tensile strength between the normal laser weld and the oscillated weld was about 5%. From Table 3, it can be observed that there were no major differences in welding with or without oscillation for the transverse tensile tests. In the case of a normal LBW and beam oscillation weld, fracture took place in HAZ areas of the weld for both tested specimens in each category. This is due to the microhardness reduction, which causes softening behavior close to the boundary between the HAZ and the BM.

3.4. Bending test results

The three-point bending test was performed on the MTS 311 load frame. The specimens for the tests were extracted from the transverse direction of the welded joint. Two samples, each for the face side (FS) and root side (RS) of the welded joint were tested. The bending specimen's dimensions were 110 mm × 24 mm. The bending test plunger diameter was 4 mm, and the distance between the centers of

the fixed support rollers was 20 mm. The diameter of the fixed support roller was 10 mm respectively. The bending test was performed at a rate of 1 mm/s. The bending test results are presented in Table 4.

Table 4. Bending test results

Process	Sample No.	Bending force [N]	Bending angle [°]	Result
Normal LBW	1a (FS)	2600	–	Broken in HAZ
	1c (FS)	2520	–	Broken in HAZ
	1b (RS)	2590	162	Crack in HAZ
	1d (RS)	2580	163	Crack in HAZ
Zigzag beam oscillated LBW	2a (FS)	2930	168	Crack in HAZ
	2b (FS)	2660	–	Broken in weld center
	2c (RS)	2630	161	No crack
	2d (RS)	2660	–	Broken in weld center

3.5. Charpy V-notch Impact test

The instrumented Charpy V-notch test was performed on three specimens each from BM and FZ with dimensions of 10 (W) × 1 (T) × 55 (L) mm at room temperature to evaluate the impact toughness of the BM and FZ. A special designed tool was used to hold the 1 mm thickness specimens during the impact tests. The specimens were incised in the FZ. Figure 9(a), (b) and (c) represent the force-displacement graphs of the BM and FZ (N-LBW and zigzag oscillation LBW), respectively.

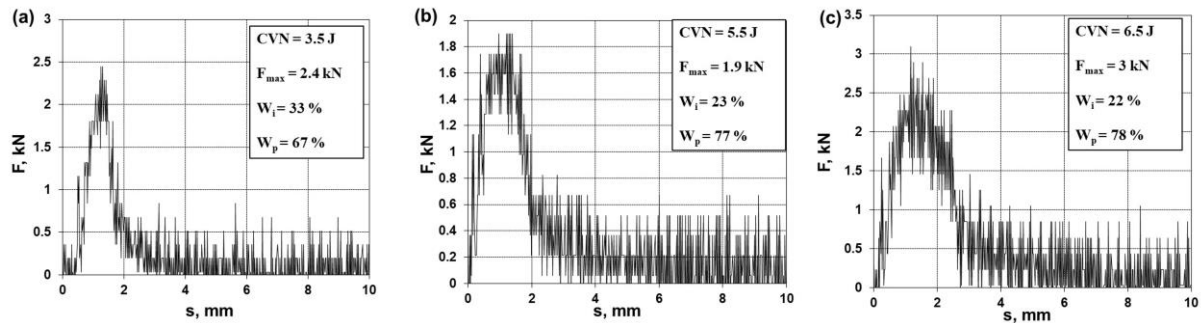


Figure 9. Force (F)-displacement (s) graph; (a) base material, (b) FZ, normal LBW, and (c) FZ, zigzag oscillation LBW.

In Table 5, the CVN values of the BM, Normal LB-welded joints and zigzag beam oscillated LBW joint from the investigated 1400M material are presented, where W_i is the crack initiation energy, W_p is the crack propagation energy and F_{max} is the maximum force.

Table 5 Measured values of instrumented Charpy V-notch test

Process	Zone	F _{max} [kN]	CVN [J]	W _i , J [%]	W _p , J [%]
N/A	BM	3	4	1.4 (34)	2.6 (66)
		3.7	4.5	1.6 (35)	2.9 (65)
		2.4	*3.5	1.2 (33)	2.3 (67)
Normal LBW	FZ	1.9	*5.5	1.3 (23)	4.2 (77)
		3.4	5	1.7 (34)	3.3 (66)
		2.6	6	2.6 (43)	3.4 (57)
Zigzag beam oscillated LBW	FZ	3	*6.5	1.4 (22)	5.1 (78)
		2.8	6.5	2.2 (34)	4.3 (66)
		2.4	5.5	0.7 (12)	4.8 (88)

*Force (F) - displacement (s) graphs are presented in Figure 9.

The average impact toughness of the BM is 4 J while that of FZ for N-LBW joint and zigzag oscillated beam welded joint are 5.5 J and 6 J, respectively. Considering that crack initiation occurs at the maximal force, the registered graph was divided into two parts based on the maximal force. The area under the curve until the maximum force was considered as the absorbed energy for crack initiation (W_i), while the remaining areas were for crack propagation (W_p). The result shows an increase in toughness in the FZ compared to the BM for both normal and oscillated welded process. Also, a rise in energy impact can be observed for the zigzag oscillated LBW joint compared to the normal LBW joint. This slight increase in the toughness can be attributed to the finer and uniform martensitic microstructure in the zigzag oscillation LBW joint compared to the normal LBW. Also, the tempering of martensite involves in the SCHAZ.

4. Conclusions

1. The beam oscillation provided the stirring effect in the weld pool results in homogenized microstructure but larger grain size, oscillation causes the laser beam to scan and melt a larger area and increase the size of the keyhole. Thus, a wider FZ and HAZ have been observed compared to normal LBW process.
2. The FZ and CGHAZ exhibit a larger grain size, which is clearly evident due to the use of the zigzag beam oscillation technique.
3. The maximum or peak hardness in a normal LBW welded joint and a beam oscillation welded joint was observed as 424 HV0.2 and 434 HV0.2 in HAZ and FZ, respectively.
4. The difference in tensile strength between the normal laser weld and the oscillated weld was about 5%. But overall, a reduction in tensile strength has been observed for both welding conditions compared to BM.
5. In the case of a normal LBW and beam oscillation weld, fracture took place in HAZ areas of the weld for both tested specimens in each category.
6. The bendability test revealed a mixed result of brittle and ductile failure.

7. The FZ of both normal LBW and zigzag oscillated beam welded joints exhibits higher impact toughness compared to the BM, with the zigzag process showing a slight improvement due to its finer and more uniform martensitic microstructure.

References

- [1] R. P. S. Sisodia, M. Gáspár, F. Hareancz, and G. Juhász, "Effect of beam oscillation on weld characteristics of laser welded," in *76th IIW Annual Assembly and Intl. Conf. on Welding and Joining (IIW 2023)*, (Singapore), 2023, pp. 16–21.
- [2] A. Grajcar, M. Róžański, S. Stano, A. Kowalski, and B. Grzegorzczuk, "Effect of Heat Input on Microstructure and Hardness Distribution of Laser Welded Si-Al TRIP-Type Steel," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, no. 2, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1155/2014/658947.
- [3] SSAB, "Docol AHSS for the Automotive Industry." <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades/martensitic-steel/1200m> (accessed May 25, 2024).
- [4] S. alden Abd al al and Á. Meilinger, *Investigation of Resistance Spot Welded Joints Made on Ultra-high-Strength Steel Sheets*. Springer International Publishing, 2023.
- [5] SSAB, "Martensitic steel: excellent formability-to-strength ratio." <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades/martensitic-steel> (accessed Apr. 13, 2023).
- [6] M. Tisza, "Material Developments in Sheet Metal Forming," *Prod. Process. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–88, 2013.
- [7] R. P. S. Sisodia, "High energy beam welding of advanced high strength steels, PhD Thesis," University of Miskolc, 2021.
- [8] R. P. S. Sisodia and M. Gáspár, "Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of Laser Beam Welded and Post-weld Heat Treated DP1400 Steel," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 3, pp. 1703–1710, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05469-x.
- [9] J. Górká and A. Ozgowicz, "Structure and properties of laser beam welded joints of low alloy high strength steel DOCOL 1200M with a martensitic structure," *Mater. Tehnol. / Mater. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 189–193, 2018, doi: 10.17222/mit.2017.077.
- [10] I. Aderibigbe, P. Popoola, R. Sadiku, and E. Biro, "Influence of low temperatures on mechanical behavior of laser welded dual phase steels," *J. Laser Appl.*, vol. 34, no. 2, p. 022011, 2022, doi: 10.2351/7.0000560.
- [11] U. Prijanovič, M. P. Tonkovič, U. Trdan, M. Pleterski, M. Jezeršek, and D. Klobčar, "Remote fibre laser welding of advanced high strength martensitic steel," *Metals*, vol. 10, no. 4, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/met10040533.
- [12] H. Stauffer, "LaserHybrid welding for industrial applications," in *XVI International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers*, Sep. 2006, vol. 6346, p. 634614, doi: 10.1117/12.738144.
- [13] H. He, F. Forouzan, J. Volpp, S. M. Robertson, and E. Vuorinen, "Microstructure and mechanical properties of laser-welded DP steels used in the automotive industry," *Materials*, vol. 14, no. 2, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/ma14020456.
- [14] A. Lisiecki, "Development of Laser Welding and Surface Treatment of Metals," *Materials*, vol. 15, no. 5, 2022, doi: 10.3390/ma15051765.
- [15] J. Viňáš *et al.*, "Properties evaluation of the welded joints made by disk laser," *Materials*, vol. 14, no. 8, 2021, doi: 10.3390/ma14082002.
- [16] A. K. Perka, M. John, U. B. Kuruveri, and P. L. Menezes, "Advanced High-Strength Steels for

- Automotive Applications: Arc and Laser Welding Process, Properties, and Challenges,” *Metals*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/met12061051.
- [17] E. S. V. Marques, A. B. Pereira, and F. J. G. Silva, “Quality Assessment of Laser Welding Dual Phase Steels,” *Metals*, vol. 12, no. 8, pp. 1–16, 2022, doi: 10.3390/met12081253.
- [18] E. Biro, J. R. McDermid, J. D. Embury, and Y. Zhou, “Softening kinetics in the subcritical heat-affected zone of dual-phase steel welds,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 9, pp. 2348–2356, 2010, doi: 10.1007/s11661-010-0323-2.
- [19] K. Rubben, H. Mohrbacher, and E. Leirman, “Advantages of using an oscillating laser beam for the production of tailored blanks,” in *Lasers in Material Processing*, 1997, vol. 3097, pp. 228–241, doi: 10.1117/12.281143.
- [20] Welding — Recommendations for welding of metallic materials — Part 2: Arc welding of ferritic steels, EN 1011-2, 2001.
- [21] Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test Part 11: Electron and laser beam welding, EN ISO 15614-11, 2002
- [22] Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing Part 2: Microhardness testing of welded joints, ISO 9015-2, 2016.
- [23] Destructive tests on welds in metallic materials — Transverse tensile test, ISO 4136, 2022.
- [24] Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests, ISO 5173, 2023.
- [25] M. Xia, E. Biro, Z. Tian, and Y. N. Zhou, “Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels,” *ISIJ Int.*, vol. 48, no. 6, pp. 809–814, 2008, doi: 10.2355/isijinternational.48.809.

POLIMERADALÉKOLT VÍZBÁZISÚ HŰTŐKÖZEGEK HŰTÉSI ERÉLYESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA A KONCENTRÁCIÓ FÜGGVÉNYÉBEN

Kuzsella László

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: laszlo.kuzsella@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Fémötvözetek tulajdonságai hőkezeléssel tág határok között változtathatók; akár ötszörös tulajdonság növekedést is el lehet érni megfelelően megtervezett és kivitelezett hőkezeléssel. Acélok esetén az egyik legrégebben alkalmazott hőkezelési eljárás, az edzés, amely a keménység és a szilárdság növelésére szolgál. Ennek a régen és széles körben alkalmazott eljárásnak az esetében is számos fejlesztés zajlik. Az edzés hűtési szakaszának gondos megtervezésével nagymértékű termikus feszültség kialakulását lehet elkerülni. Erre szolgálnak a jól skálázható, pontosan beállítható hűtési tulajdonságokkal rendelkező, környezetbarát, vízhez adalékolható polimerek, amelyeket egyre gyakrabban használnak a hagyományos hűtőolajok mellett. Ilyen új fejlesztésű polimeradalék különböző koncentrációkban vízhez kevert hűtési erélyességét vizsgálja a bemutatott méréssorozat.

Kulcsszavak: polimer adalék, PAG, vízbázisú hűtőközeg, hűtési erélyesség

Abstract

The properties of metal alloys can be changed within wide range by heat treatment. Even five times improved property benefit can be achieved with properly planned and executed heat treatment. In case of the iron alloys one of the earliest used heat treatment method is the quenching, which gives elevated hardness and strength to the material. But even in the case of this long-standing and widely used method, many developments are taking place in this area. By carefully planning the cooling phase of the quenching, it can be avoid the development of a larger amount of thermal stress. Special, environmental friendly polymers with well-tailored, precisely adjustable cooling property that can be added to water are used for that, and are increasingly used alongside traditional cooling oils. The presented measurement series examines the different cooling properties of such a newly developed polymer additive solved in water in different concentrations.

Keywords: polymer addition, PAG, water-based quenchant, cooling capacity

1. Bevezetés

A fémek, különösen az acél ötvözetek tulajdonságainak megváltoztatására számos hőkezelési technológiát fejlesztettek ki, és az egyes technológiákat tökéletesítik, az elérni kívánt tulajdonságok érdekében. A már bejáratott, régi eljárásoknak is újabb és újabb változatait fejlesztik. Ilyen például az edzés, amelynek, bár már atomi szinten is ismert a mechanizmusa, máig új változatai jelennek meg [1].

Edzés során, először ausztenitesítjük az acélt majd megfelelően nagy lehűtési sebességgel hűtve, az egyensúlyi perlites és a nem egyensúlyi bénites átalakulást elkerülve, diffúziómentesen, martenzites szövetet hozunk létre. Azonban, az edzett munkadarab tulajdonságai szempontjából nem mindegy, hogy milyen a keletkezett martenzit szerkezete és az átalakulás miatt kialakult szerkezeti feszültsége, valamint a gyors hűlés hatására keletkezett termikus feszültségek nagysága. A feszültségek csökkentésére fejlesztették ki a lépcsős edzést, vagy martemperálást, amelynek során a munkadarabot nem közvetlenül szobahőmérsékletre, hanem a martenzites átalakulás kezdő hőmérsékletéig hűtve, egy hőkiegyenlítő izotermát beiktatva, a kéreg és a mag hőmérséklete közötti különbséget kiegyenlítve, jóval kisebb termikus feszültségek maradnak a munkadarabban. Ebben az esetben a hűtőközeg hőmérsékletét változtatják meg oly módon, hogy a kedvezőbb tulajdonságokat kapjunk [2].

Egy másik lehetőség, ha a hűtőközeg tulajdonságait, hőelvonó képességét, viszkozitását alakítjuk úgy, hogy a munkadarab hűlési sebessége olyan legyen, hogy az elégséges, ám szükséges lehűlési sebességtől nem nagyobb (kritikus lehűtési sebesség) biztosítja a munkadarab számára. Ilyen lehetőséget biztosít a hűtőközegek tulajdonságainak skálázása.

A közönséges hűtőközegek közül a víznek van a legnagyobb hőelvonó képessége. Vagyis, a munkadarabot vízben való hűtése nagy valószínűséggel martenzites szövetet eredményez, de a legtöbb esetben jóval kisebb hűtési sebesség is elegendő. Ezért terjedtek el az ásványi, később a különböző szintetikus edzőolajok. Környezetvédelmi és egyéb szempontokat figyelembe véve, más jellegű, hűtő-, edzőközegek is kezdenek teret hódítani. Ilyenek például, napjaink ígéretes hűtőközegei, a skálázható tulajdonságokat biztosító vízbázisú, polimeradalékolt hűtő-, edzőközegek [3]. A publikáció egy olyan vizsgálat sorozat eredményét foglalja össze, melyben polialkilén-glikol (PAG) polimer adalékot különböző koncentrációban vízhez adalékolva, vizsgáltuk az oldatok hűtési jellemzőit, különböző mérőszámok alapján.

2. Vizsgálati körülmények

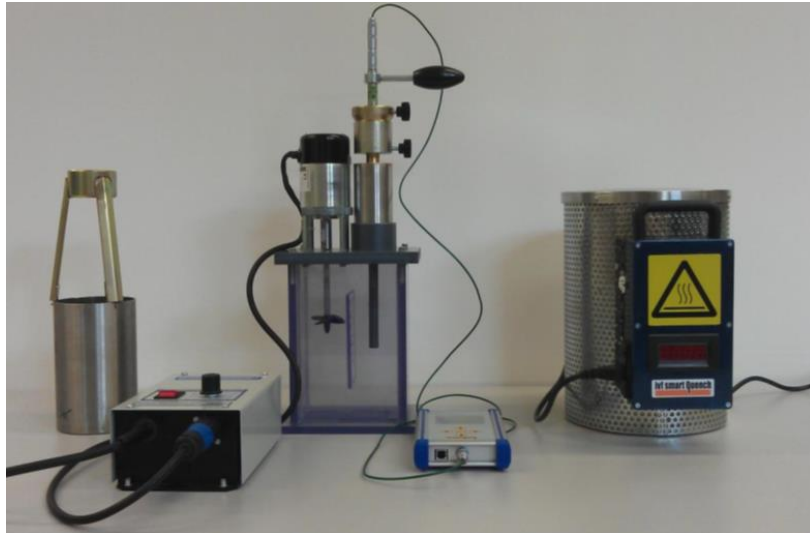
2.1. A vizsgáló rendszer

A hűtőközegek minősítését két fő csoportba lehet sorolni. Az első csoport csak magát a hűtőközeget vizsgálja. Ezek a mérések a hűtőközeg hőelvonási képességét és az állapotának jellemzőit (hőmérséklet, szennyezettség mértéke, áramlási viszonyok és a koncentráció), befolyásoló tényezőit határozzák meg. Ezeket az eljárások főleg a hűtőközegek összehasonlítására fejlesztették ki, hiszen a közegről adnak információt, a próbatest és a folyadék közötti interakciót nem jellemzik. A második csoportba az edzési teljesítmény minősítésére kifejlesztett eljárások tartoznak. Ezek a szabványos eljárások az edzőközeg azon jellemzőit határozzák meg, amelyek a szabványos geometriai méretekkel és alapanyaggal rendelkező alkatrészeknek, a közegben való hűtés közben felvett hűlési görbék alapján meghatározott hőelvonó képességét és hűtési kinetikáját közvetetten jellemzik. A jelen publikációban alkalmazott rendszer a második csoportba sorolható.

A hűtőközeg hőelvonását jellemző hőmérséklet-idő diagramok felvételére az *IvfSmartQuench* típusú, több részegységből álló minősítő rendszert alkalmaztuk, amely az 1. ábrán látható. A mérő és feldolgozó rendszer az alábbi szabványok mindegyikének megfelel [4].

- ISO 9950:1995, „Industrial quenching oils – Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method”
- ASTM D 6200-01, „Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quenching Oils by Cooling Curve Analysis”

- ASTM D 6482-06, „Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method)”



1. ábra. A mérőrendszer [5].

A mérés előtt a termoelemmel ellátott *Inconel 600* anyagminőségű etalon rudat a speciális kemencében 850°C fölé kell hevíteni (kb. 865°C). A megfelelő hőmérséklet stabilizálódása után az etalont késlekedés nélkül, a speciális, agitációval ellátott tartályba helyezve kezdődik a mérés, a hűlési görbét 850°C -ról szobahőmérsékletig felvéve. A lehülési görbékből, vagyis az etalonban elhelyezett termoelemek által az idő függvényében rögzített hőmérsékletből, a rendszerhez tartozó szoftver segítségével határozzuk meg a hűtés erélyességének jellemzésére szolgáló mennyiségeket.

A lehülési görbékből a hűtőközegek hűtési erélyességének jellemzésére számos mérőszámot alkottak, ezek közül a leggyakrabban használtakat foglalja össze a 1. táblázat [6].

1. táblázat. Legfontosabb hűtési erélyességet jellemző mérőszámok

Jelölés	Megnevezés
C [V%]	A vízbázisú oldat koncentrációja
CR_{300} [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]	Hűlési sebesség 300°C -on
CR_{max} [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]	A hűlési sebesség maximuma
$T(\text{CR}_{\text{max}})$ [$^{\circ}\text{C}$]	A maximális hűlési sebességhez tartozó hőmérséklet
$t(\text{CR}_{\text{max}})$ [s]	A maximális hűlési sebességhez tartozó idő
T_{vp} [$^{\circ}\text{C}$]	A gőz és a forrási szakasz közötti látszólagos átmeneti hőmérséklet
T_{cp} [$^{\circ}\text{C}$]	A forrási és a konvekciós szakasz közötti látszólagos átmeneti hőmérséklet
HP [-]	A hűtőközeg edzési teljesítménye

2.2. A vizsgált anyag

A vizsgálatsorozat során új fejlesztésű, szintetikus olaj bázisú, polialkilen-glikol (PAG) polimer adalékot vizsgáltunk, amely az edző- és hűtőközegek területén az egyik legkorszerűbb és egyre gyakrabban alkalmazott polimer. Legérdekesebb és legizgalmasabb tulajdonsága a vízzel való kiváló

elegyedése, a kémiai összetételtől függően a 60-90 °C közötti tartományon inverz oldhatóság jellemzi [7]. Emellett még számos más kedvező tulajdonsággal is rendelkezik [8]:

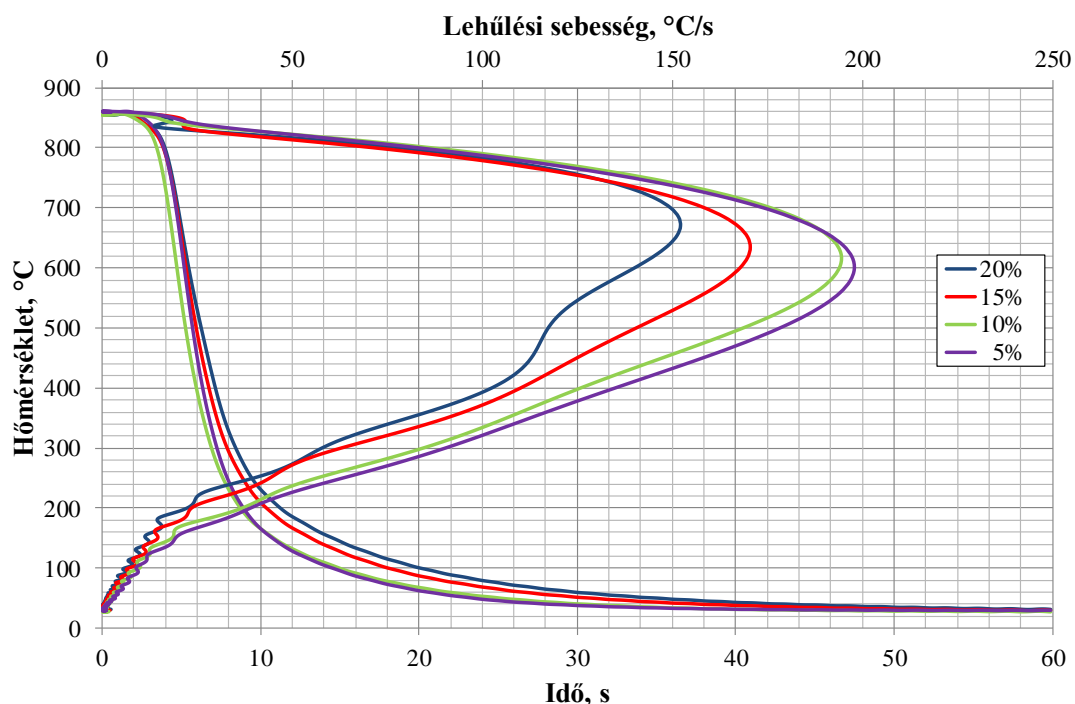
- reprodukálható hűtést eredményez,
- csökkenti a vetemedés és a repedés kockázatát,
- nem tartalmaz szennyező anyagokat,
- nem tűz- vagy füst veszélyes,
- jó az idő- és a hőstabilitása.

A polimer adalék jellemző tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. Polialkilén-glikol szintetikus olaj bázisú új fejlesztésű adalék jellemző tulajdonságai

Polimer típusa	PAG
Folyadék színe	világossárga
Sűrűsége 20°C-on	1,09 g/cm ³
Kinetikus viszkozitása 40 °C-on	310 ... 355 mm ² /s
Koncentráció pH értéke	kb. 9,4

Ötféle bekeverési koncentrációban, 0, 5, 10, 15, 20 térfogat százaléku (V%) oldatnak vizsgáltuk a polimeradalék hatását a hűtési paraméterekre. A 0 V%-os, vagyis a polimer adalékot nem tartalmazó „oldat”, természetesen a tiszta víz. Minden oldat esetében három párhuzamos mérést végezve vettük fel a lehülési görbéket. Az oldatok esetében felvett egy-egy lehülési illetve lehülési sebesség görbét szemléltet a 2. ábra.



2. ábra. Lehülési görbék és a hozzájuk tartozó lehülési sebesség görbék a különböző koncentrációjú oldatok esetén.

3. Eredmények értékelése

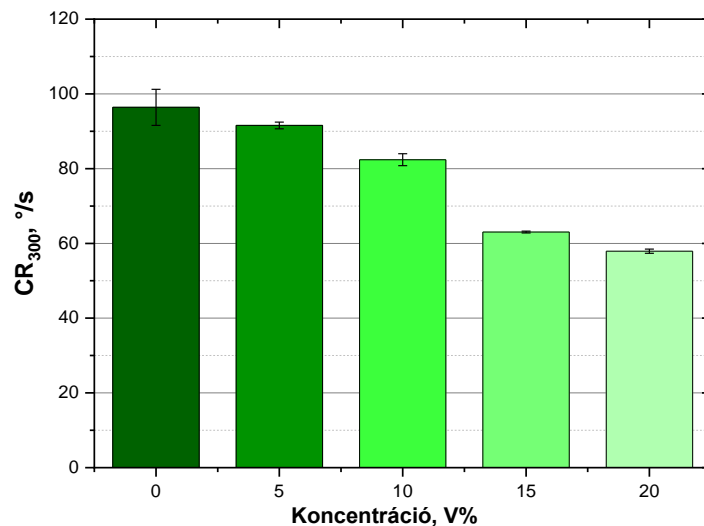
A vizsgálatok során kiszámolt mérési eredmények egyenként és statisztikai kiértékelésük 3. táblázatban található.

3. táblázat. Mérési eredmények és statisztikus kiértékelésük

V [%]	Sorszám, statisztikai jellemző	CR ₃₀₀ [°C/s]	CR _{max} [°C/s]	T(Cr _{max}) [°C]	t(Cr _{max}) [s]	T _{CP} [°C]	T _{VP} [°C]	HP [-]
0	1. mérés	91,00	212,27	605,81	5,20	125,77	844,85	1 819,16
	2. mérés	97,97	230,45	623,97	4,21	121,51	849,66	1 929,28
	3. mérés	100,25	240,78	645,15	3,96	143,45	850,59	1 972,94
	Átlag	96,41	227,83	624,98	4,46	130,24	848,37	1 907,13
	Szórás	4,82	14,43	19,69	0,66	11,63	3,08	79,25
	Relatív szórás [%]	5,00	6,34	3,15	14,71	8,93	0,36	4,16
5	1. mérés	92,42	204,37	640,55	5,33	125,60	853,69	1 802,45
	2. mérés	91,65	208,05	639,90	6,33	154,23	851,43	1 795,97
	3. mérés	90,63	197,80	596,93	6,20	117,97	859,39	1 768,31
	Átlag	91,57	203,41	625,79	5,95	132,60	854,84	1 788,91
	Szórás	0,90	5,19	25,00	0,54	19,12	4,10	18,13
	Relatív szórás [%]	0,98	2,55	3,99	9,13	14,42	0,48	1,01
10	1. mérés	82,21	188,54	635,92	7,94	138,51	843,20	1 638,15
	2. mérés	80,89	182,59	634,65	6,33	139,26	848,70	1 601,51
	3. mérés	84,07	194,25	604,93	5,71	130,70	856,65	1 666,02
	Átlag	82,39	188,46	625,17	6,66	136,16	849,52	1 635,23
	Szórás	1,60	5,83	17,54	1,15	4,74	6,76	32,35
	Relatív szórás [%]	1,94	3,09	2,81	17,28	3,48	0,80	1,98
15	1. mérés	63,29	166,57	675,75	6,57	168,52	846,96	1 308,33
	2. mérés	63,06	150,63	632,72	6,82	165,24	841,83	1 269,96
	3. mérés	62,79	170,48	637,74	6,08	161,27	836,24	1 335,85
	Átlag	63,05	162,56	648,74	6,49	165,01	841,68	1 304,71
	Szórás	0,25	10,52	23,53	0,38	3,63	5,36	33,09
	Relatív szórás [%]	0,40	6,47	3,63	5,80	2,20	0,64	2,54
20	1. mérés	58,56	153,50	672,72	7,07	182,41	838,23	1 142,61
	2. mérés	57,48	126,86	673,76	7,19	158,08	835,10	1 045,67
	3. mérés	57,73	152,18	677,19	5,95	180,59	837,01	1 109,01
	Átlag	57,92	144,18	674,56	6,74	173,69	836,78	1 099,10
	Szórás	0,57	15,01	2,34	0,68	13,55	1,58	49,22
	Relatív szórás [%]	0,98	10,41	0,35	10,15	7,80	0,19	4,48

Az eredményeket (átlag és szórás) oszlopdiagramokban ábrázolva jobban megfigyelhető a koncentráció hatása az egyes számított jellemzőkre.

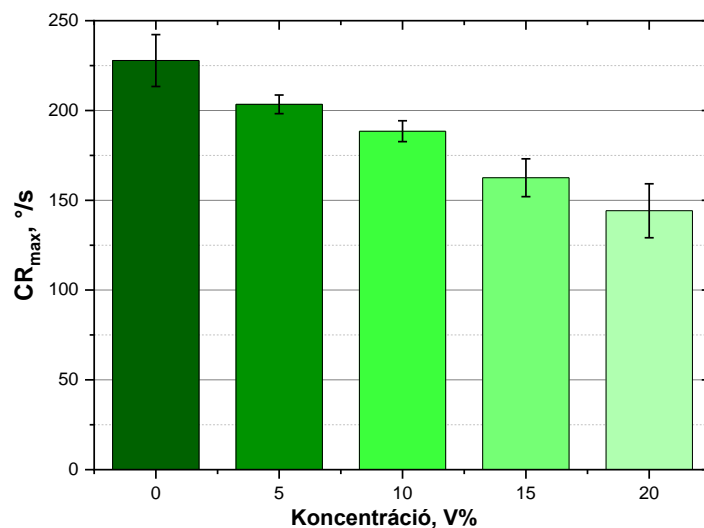
A polimeradalék koncentráció növelésének függvényében a 300 °C-on mért lehülési sebesség eredményeit a 3. ábra tartalmazza.



3. ábra. A 300 °C-on mért lehülési sebesség a koncentráció növelésének függvényében.

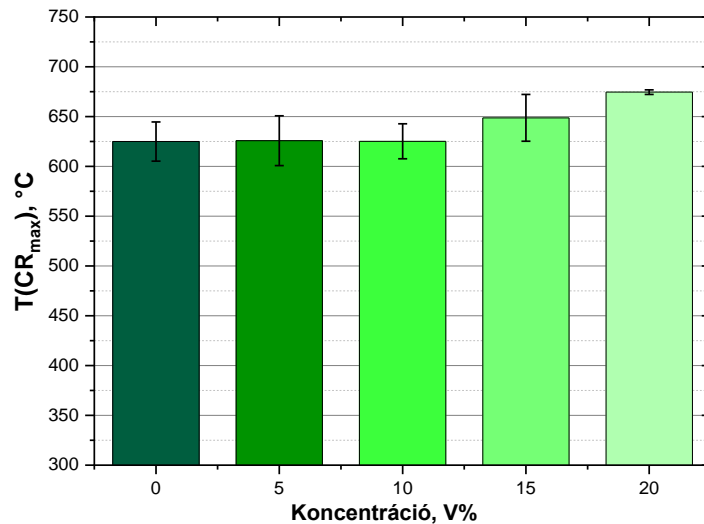
A három mérésből számolt értékek meglepően kis szórással rendelkeznek, melyet az oszlopok tetején látható (kis pálcák által mutatott) szórás mezők ábrázolnak. Összességében megállapítható, hogy 300°C-on tapasztalható lehülési sebesség a koncentráció növekedésével fokozatosan csökken.

A koncentráció változásának függvényében a mérések során meghatározott legnagyobb lehülési sebességek eredményeit a 4. ábra tartalmazza.



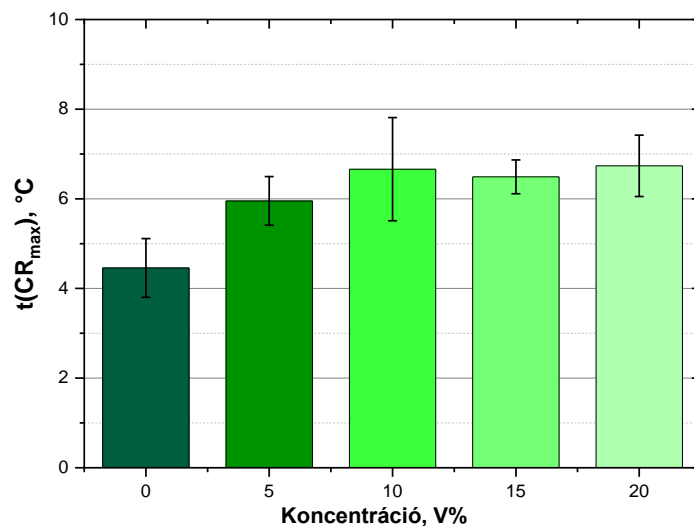
4. ábra. A legnagyobb lehülési sebességek a koncentráció függvényében.

A mérések során, a teljes mérés közben meghatározott legnagyobb lehülési sebességek, a 300°C-on meghatározott sebességekhez hasonlatosan, a koncentráció növekedésével fokozatosan csökkennek. A koncentráció növelésével a lehülés folyamatosan lassul, amelynek hatására a vetemedés és a repedés keletkezésének valószínűsége is csökken, mert a munkadarab külső része sem hűl sokkal nagyobb mértékben a belsejéhez képest.



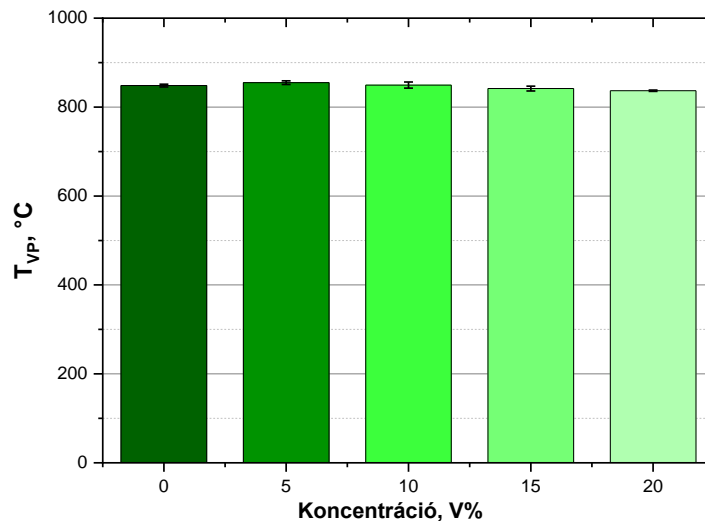
5. ábra. A legnagyobb lehülési sebességhez tartozó hőmérséklet a koncentráció függvényében.

Az 5. ábra a legnagyobb lehülési sebességhez tartozó hőmérsékletet ábrázolja a koncentráció változtatásának függvényében. Az ábrán látható adatok alapján az állapítható meg, hogy a polimerkoncentráció növekedésének hatására egyre nagyobb hőmérsékleten jelentkezik a maximális sebesség, a mérési eredmények szórását figyelembe véve azonban ez a tendencia nem egyértelmű.



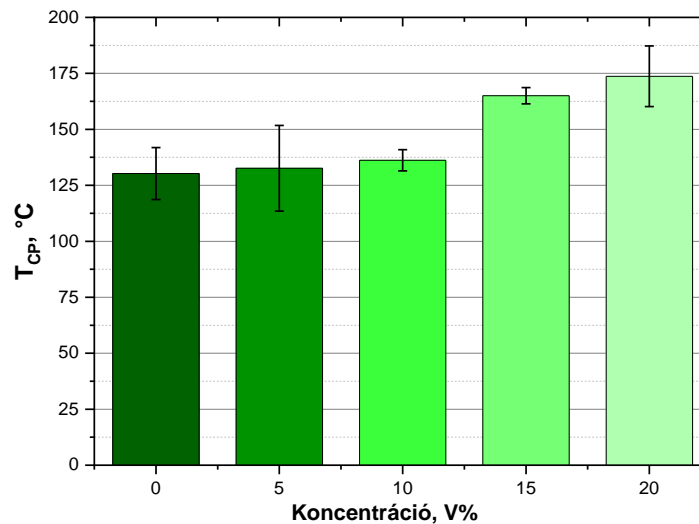
6. ábra. A legnagyobb hűlési sebességhez tartozó idő a koncentráció függvényében.

A legnagyobb lehülési sebesség megjelenéséhez tartozó lehülési idő tendenciája egyértelműbben mutatja, hogy a csökkenő maximális sebesség és a közel azonos hozzá tartozó hőmérsékleteknek megfelelően, a koncentráció növelésének hatására egyre később, egyre hosszabb idő után jelentkezik a maximális lehülési sebesség. Ezt mutatja a 6. ábra.



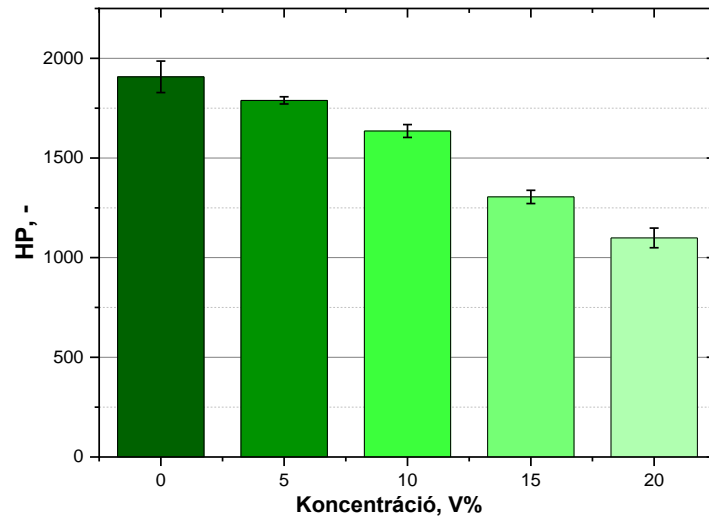
7. ábra. Látszólagos átmeneti hőmérséklet a gőz és a forrási szakasz között.

A 7. ábra alapján a gőz és a forrási szakasz közötti átmeneti hőmérsékletre nincs hatással a polimeradalék koncentrációjának növelése.



8. ábra. Látszólagos átmeneti hőmérséklet a forrási és a konvekciós szakasz között.

A forrási és a konvekciós szakasz közötti átmeneti hőmérséklet nagyságában, az alacsonyabb koncentráció tartalmú hűtőközegek esetében nem tapasztalható jelentős mértékű változás, azonban a nagyobb koncentráció tartalmú közegeknél ez a hőmérséklet ugrásszerűen növekedett (8. ábra).



9. ábra. A hűtőközeg edzési teljesítménye.

A hűtőközeg edzési teljesítménye folyamatosan és jelentős mértékben csökken a koncentráció növelése során, a legnagyobb koncentráció tartalmú közegnél csaknem a felére csökken, a tiszta vízhez viszonyított teljesítményhez képest, amit a 9. ábra egyértelműen igazol.

4. Összefoglalás

Acél- és vasötvözetek keménységének és szilárdságának, de különösen kopásállóságának a növelésére leggyakrabban és legrégebben az edzés hőkezelési technológiáját alkalmazzák. Az eljárás kritikus része a hűtés, amelynek során a nagy lehülési sebesség következtében a munkadarab vetemedhet, vagy akár el is törhet. Ezen veszélyek csökkentését és elkerülését a megfelelő hűtőközeg alkalmazásával lehet elérni, úgy, hogy a hűlési sebesség ne legyen nagyobb mint a szükséges, de elégséges legyen, hogy martenzites szövet alakuljon ki. A hűtési erélyesség beállításának korszerű és hatékony módja, a koncentráció változtatásával skálázható tulajdonságokkal rendelkező vízbázisú, polimeradalékolt hűtő-, edzőközegek alkalmazása.

A cikkben bemutatott vizsgálatsorozattal új fejlesztésű szintetikus, polialkilén-glikol (PAG) polimer adalékot vizsgáltunk különböző koncentrációban vízhez adalékolva, amely a hűtő- és edzőközegek területén az egyik legkorszerűbb és egyre gyakrabban alkalmazott adalék.

Ötféle bekeverési koncentrációban, 0, 5, 10, 15, 20 térfogat százalékos (V %) oldatnak vizsgáltuk a polimeradalék hatását a hűtési paraméterekre. Minden oldat esetében három párhuzamos mérést végezve vettük fel a lehülési görbéket.

A mérések szórási intervallumát is figyelembe véve, a HP, a CR_{300} és a CR_{max} esetében volt egyértelmű leginkább a polimeradalék koncentráció változtatásának hatása. Az edzési teljesítmény változása egyértelműen mutatja a polimeradalék hatását: a koncentráció növelésével az edzési teljesítmény csökken, és ez a hatás különösen nagyobb koncentrációknál jelentős. Olyan acéloknál, amelyeknél a kisebb hűtési sebesség is megfelelő beedződést biztosít, nagyobb polimerkoncentrációt alkalmazva csökkenthető a keletkezett termikus feszültség nagysága.

A legnagyobb lehülési sebesség megjelenéséhez tartozó lehülési idő tendenciája azt mutatja, hogy a csökkenő maximális sebesség és a közel azonos hozzá tartozó hőmérsékleteknek megfelelően, a koncentráció növelésének hatására egyre később, egyre hosszabb idő után jelentkezik a maximális lehülési sebesség.

A vizsgálatsorozat eredményeként megadható, hogy adott összetételű acélminőségnek leginkább megfelelő hűtési karakterisztikához milyen koncentrációjú oldatra van szükség az adott PAG polimeradalékból. Ezzel nagymértékben csökkenteni lehet az anyagban keletkező termikus feszültség nagyságát, ami csökkenti az edzés utáni repedés keletkezésének esélyét, növeli az anyag szilárdságát és szívósságát.

Irodalom

- [1] G. Krauss, „*Steels processing, structure and performance*”, ASM International, 2015, doi: 10.31399/asm.tb.spsp2.9781627082655.
- [2] X. Luo, G. E. Totten, L. C. F. Canale, and R. L. S. Otero, “Quenchants and Quenching Technology”, *ASM Handbook*, vol. 4F, pp. 453–500, 2024, doi: 10.31399/asm.hb.v4F.a0007014.
- [3] I. Felde, „Acélok edzéséhez használatos hűtőközegek hűtőképességének minősítése kvantitatív kritérium alapján”, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2006.
- [4] G. Kerekes, „Folyékony edzőközegek ISO 9950 szabvány szerinti vizsgálatának és minősítésének gyakorlata”, oktatási segédlet, Miskolci Egyetem, 2013.
- [5] I. Felde, G. Kerekes, and A. Mucsi, „Edzőközegek korszerű vizsgálati módszerei”, Miskolci Egyetem, 2015.
- [6] G. E. Totten, and L. Canale, “Polymer Quenchants”, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 1–11, 2005, doi:10.1016/b0-08-043152-6/02036-2.
- [7] T. X. Tran, X. P. Nguyen, D. N. Nguyen, D. T. Vu, M. Q. Chau, O. I. Khalaf, and A. T. Hoang, “Effect of Poly-Alkylene-Glycol Quenchant on the Distortion, Hardness, and Microstructure of 65Mn Steel”, *CMES*, vol. 67, Issue 3, pp. 3249–3264, 2021, doi: 10.32604/cmc.2021.015411.
- [8] X. Chen, L. Zhang, X. Jie, Y Li, and X Huang, “Quenching characteristics of glycerol solution as a potential new quenchant”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. 109, pp. 209–214, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.013.

A HOZAGANYAG ÉS A FÁRADÁSOS REPEDÉSTERJEDÉSI VISELKEDÉS KAPCSOLATA NAGYSZILÁRDSÁGÚ SZERKEZETI ACÉLOK HEGESZTETT KÖTÉSEINÉL

Kovács Judit

Tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: judit.kovacs@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett szerkezetek gyakran vannak ismétlődő igénybevételnek kitéve, ami fáradásos repedések kialakulását és terjedését, majd a szerkezeti elem vagy a szerkezet fáradásos töréstörését okozhatja. A hegesztett kötések tervezésekor és a hozaganyag választáskor ezt figyelembe kell venni. A hozaganyag hatásának tanulmányozása érdekében 700-1300 MPa szilárdsági kategóriába tartozó alapanyagokból huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés segítségével készítettünk hegesztett kötéseket. Az alapanyagok szilárdságának függvényében az alkalmazott hozaganyagok undermatching, matching vagy overmatching típusúak voltak. A hegesztett kötésekben kimunkált próbatesteken fáradásos repedésterjedési vizsgálatokat végeztünk, amelyek során a próbatestek bemetszésének helye és a repedésterjedés iránya változó volt. A vizsgálatok után a Paris-Erdogan-összefüggés két paraméterét (C és n) minden egyes próbatestre meghatároztuk. Majd elemeztük a paraméterek kapcsolatát és a különböző orientációk és hozaganyag típusok hatását.

Kulcsszavak: nagyszilárdságú acél, hegesztett kötés, hozaganyag választás, fáradásos repedésterjedés

Abstract

High-strength steel welded structures are often subjected to cyclic loading, which can cause fatigue crack initiation and propagation, and subsequent fatigue failure of the structural element or structure. This should be taken into account when designing welded joints and selecting the filler metal. In order to study the effect of the filler metal, welded joints were made from materials in the 700-1300 MPa strength category using gas metal arc welding process. The filler metals used were undermatching, matching or overmatching type depending on the strength of the base materials. Fatigue crack propagation tests were carried out on specimens prepared from the welded joints, in which the location of the notch in the specimens and the direction of crack propagation were varied. After the tests, the two parameters of the Paris-Erdogan law (C and n) were determined for each specimen. Subsequently, the relationship between the parameters and the effect of different orientations and filler metal types were analyzed.

Keywords: high strength steel, welded joints, filler metal selection, fatigue crack growth

1. Bevezetés

A modern acélgyártási eljárások lehetővé teszik, hogy nagyon nagy szilárdságú acélokat állítsanak elő különböző alkalmazásokhoz, például hajókhoz, könnyűszerkezetekhez és nagy terhelésű hegesztett szerkezetekhez, darukhoz és egyéb építőipari gépekhez, autóipari felhasználáshoz, teherautókhoz. Napjainkban vastag lemezek esetén akár 1300 MPa folyáshatárú nagyszilárdságú szerkezeti acélok is beszerezhetők [1]–[4]. A nagyszilárdságú acélok alkalmazásának számos előnye lehet. Ezen acélok felhasználásával vékonyabb, könnyebb, de erősebb elemek építhetők, amelyek mozgó szerkezetek esetén különösen előnyösek. A kisebb keresztmetszet kisebb anyagigényt jelent az alapanyagok és a hozaganyagok oldalán egyaránt, ezáltal a gyártási idő és a gyártási költségek is csökkenhetnek. A végeredményben kisebb tömegű szerkezet üzemeltetése energia-megtakarítást eredményezhet [5]–[9]. Ugyanakkor, a növelt szilárdság és a szerkezet működése által megkívánt szívósság egyensúlyának a megteremtése, illetve az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállás biztosítása [10], a szerkezet integritása érdekében [11]–[12], komplex megközelítést igényel.

Jó mechanikai tulajdonságai és potenciális előnyei ellenére a nagyszilárdságú acélok hegesztése még mindig tartogat kihívásokat, főként a megfelelő hegesztéstechnológia megtervezése terén. Ezen kívül, a nagy folyáshatár miatt, megjelenik a hozaganyag-választás örök dilemmája, mivel még csak 1100 MPa folyáshatárú anyagokhoz lehet matching típusú hozaganyagot beszerezni [5], [6], [13]–[18]. Mivel azismétlődő igénybevételek esetén a hegesztett szerkezetek élettartama korlátozott, szintén fontos a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálata. A fáradásos repedésterjedés nagymértékben függ az anyagszerkezettani sajátosságoktól és a vizsgálati körülményektől. A szövetszerkezeti jellemzők befolyásolják a repedés terjedési útvonalát és sebességét, vagyis ezáltal a törés morfológiáját. Mivel a különböző anyagok különböző szövetszerkezettel és mechanikai tulajdonságokkal, ezáltal különböző repedésterjedési viselkedéssel rendelkeznek, felhasználás előtt ezt is meg kell vizsgálni [19]–[21]. Emellett, közismert tény, hogy a hegesztett kötések fáradási szilárdsága kisebb, mint az alapanyagoké. Ezt elsősorban a különböző eltérések vagy hibák jelenléte miatti helyi feszültségkoncentrációk és a hegesztés következtében kialakuló maradó feszültségek okozzák, így az ismétlődő igénybevétel a hegesztett szerkezetek meghibásodásának meghatározó oka lehet [2], [22].

Jelen kutatómunka célja a fáradásos repedésterjedési vizsgálatok eredményei alapján kiszámított Paris-Erdogan összefüggés két paraméterének (C és n) az elemzése, különböző nagyszilárdságú szerkezeti acélok és különböző hozaganyag típusokkal (undermatching, matching és overmatching) készített hegesztett kötések esetén.

2. A vizsgált anyagminőségek

A kutatómunkánk során öt különböző, 700-1300 MPa szilárdsági kategóriába tartozó nagyszilárdságú szerkezeti acélon végeztünk vizsgálatokat. A vizsgált alapanyagok a következők voltak:

- S690QL: Optim 700QL (RUUKKI),
- S960QL: Weldom 960E (SSAB),
- S960M: Alform 960M (Voestalpine),
- S1100M: Alform 1100 x-treme (Voestalpine),
- S1300Q (ismeretlen gyártó).

A vizsgált acélok vastagságát és mechanikai tulajdonságait az 1. táblázat, kémiai összetételét pedig a 2. táblázat tartalmazza. A táblázatokban összefoglalt adatok az alapanyagok műbizonylataiban

szerepelnek, kivéve az S1300Q anyagminőséget, amelyhez műbizonylat nem állt rendelkezésre, ezért meg kellett határozni a mechanikai tulajdonságait és vegyelemzést is kellett végezni a kémiai összetétel megismerése érdekében.

1. táblázat. A vizsgált acélok vastagsága és mechanikai tulajdonságai

Alapanyag	Vastagság [mm]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	R _{p0.2} /R _m [-]	A [%]	Charpy-V ütőmunka - 40 °C-on, KV [J]
S690QL	30	809	850	0,952	17,0	106
S960QL	15	1014	1053	0,963	14,0	75
S960M	15	1051	1058	0,993	17,0	177
S1100M	15	1193	1221	0,977	11,6	88
S1300Q	10	1300	1560	0,833	12,0	78

2. táblázat. A vizsgált acélok kémiai összetétele [tömeg%]

Alapanyag	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
S690QL	0,160	0,310	1,010	0,010	0,001	0,610	0,210	0,205
S960QL	0,17	0,23	1,23	0,011	0,001	0,20	0,04	0,588
S960M	0,084	0,330	1,650	0,011	0,0005	0,610	0,026	0,290
S1100M	0,127	0,319	1,620	0,009	0,0015	0,630	0,320	0,620
S1300Q	0,23	0,45	1,86	0,012	0,001	0,85	2,43	0,360
Alapanyag	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	Zr
S690QL	0,10	0,16	0,15	0,041	0,001	0,002	0,003	N/A
S960QL	0,041	0,004	0,01	0,061	0,017	0,001	0,002	N/A
S960M	0,078	0,014	0,016	0,038	0,035	0,0015	0,006	N/A
S1100M	0,066	0,011	0,047	0,035	0,037	0,0014	0,0042	N/A
S1300Q	0,030	0,002	0,093	0,063	<0,001	N/A	N/A	<0,001

3. Hegesztési kísérletek

A kémiai összetétel alapján a karbonegyenértékeket az EN 10025-1 szabvány [23] szerint számítottuk ki. A kiszámított CEV (1) és CET (2) értékek a 3. táblázatban láthatók.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (2)$$

3. táblázat. CEV és CET értékek

Alapanyag	CEV [%]	CET [%]
S690QL	0,535	0,32
S960QL	0,540	0,36
S960M	0,557	0,31
S1100M	0,680	0,39
S1300Q	0,956	0,56

A vizsgált öt különböző nagyszilárdságú acélokon hegesztési kísérleteket végeztünk különböző szilárdsági kategóriákba tartozó és különböző típusú hozaganyagok alkalmazásával. A felhasznált hozaganyagok mindegyikének az átmérője $d = 1,2$ mm volt, és azok a szabványos jelöléssel kiegészítve a következők voltak:

- INEFIL NiMoCr (MSZ EN ISO 16834 [24]: G 69 4 M Mn3Ni1CrMo);
- ESAB OK Tubrod 14.03 (MSZ EN ISO 18276 [25]: T 69 4 Mn2NiMo M M 2 H5);
- Böhler Union X85 (MSZ EN ISO 16834 [24]: G 79 5 M Mn4Ni1,5CrMo);
- Böhler Union X90 (MSZ EN ISO 16834 [24]: G 89 6 M Mn4Ni2CrMo);
- Böhler Union X96 (MSZ EN ISO 16834 [24]: G 89 5 M Mn4Ni2,5CrMo);
- Böhler Alform 1100 L-MC (MSZ EN ISO 18276 [25]: TZ2T15-1M21A-N4C1M2-H5).

A hegesztett kötések elkészítéséhez használt különböző hozaganyag – alapanyag kombinációkat a 4. táblázat foglalja össze.

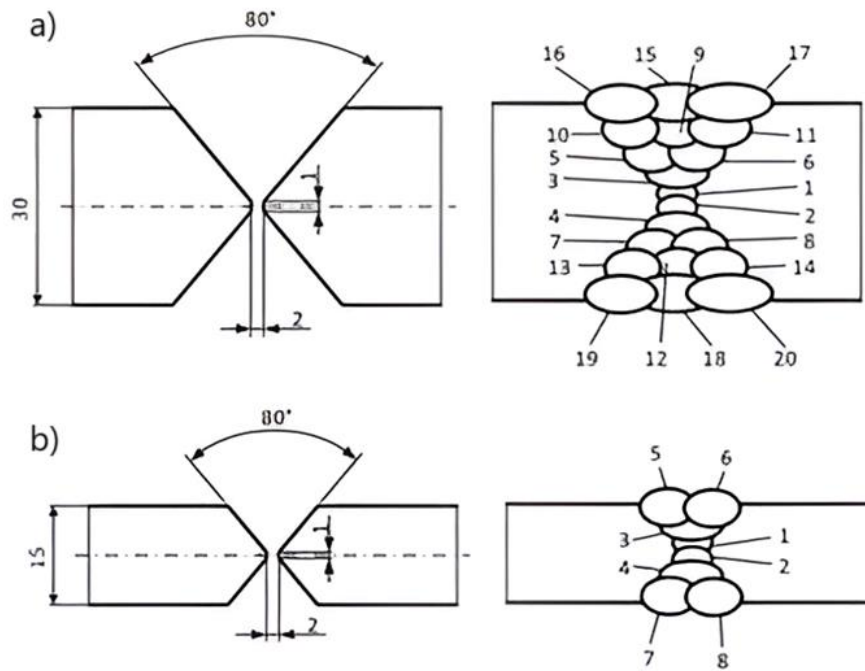
4. táblázat. A különböző alapanyag – hozaganyag kombinációk

Alapanyag	Hozaganyag	Kombináció
S690QL	NiMoCr	matching
S690QL	Union X85	matching
S690QL	Union X90	overmatching
S690QL	Union X85 / Union X90	matching / overmatching
S960M	Union X96	matching
S960M	Union X90	undermatching
S960M	OK Tubrod 14.03	undermatching
S960QL	Union X96	matching
S1100M	Union X96	undermatching
S1100M	Alform 1100 L-MC	matching
S1300Q	Union X96	undermatching
S1300Q	Alform 1100 L-MC	undermatching

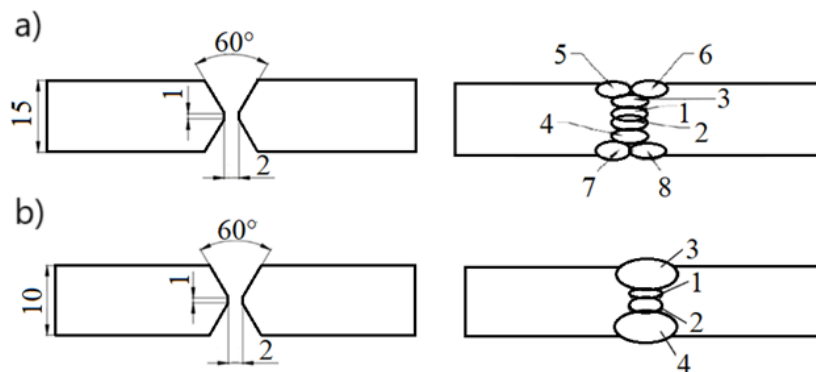
Ahogy az a táblázatban is látható, a vizsgált alapanyagok esetén különböző alapanyag – hozaganyag kombinációkat alkalmaztunk: undermatching (UM), matching (M) és overmatching (OM). Az S1300Q anyag kivételével minden esetben használtunk matching típusú hozaganyagot, az

S1300Q esetén erre nem volt mód, mivel matching típusú hozaganyagot jelenleg csak 1100 MPa folyáshatárig lehet beszerezni.

A hegesztett kötések elkészítéséhez a választott eljárás a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés volt, a kötések Daihen WB-P500L típusú áramforrással készültek. A 350 mm x 150 mm x 10/15/30 mm-es X leélezésű lemezeket PA pozícióban egyesítettük. A leélezést és a varratsorokat az 1. és a 2. ábrák szemléltetik.



1. ábra. A kötéskialakítás és a varratsorok sematikus ábrája a) S690QL, b) S960QL, S960M anyagminőségek esetén [26].



2. ábra. A kötéskialakítás és a varratsorok sematikus ábrája a) S1100M, b) S1300Q anyagminőségek esetén.

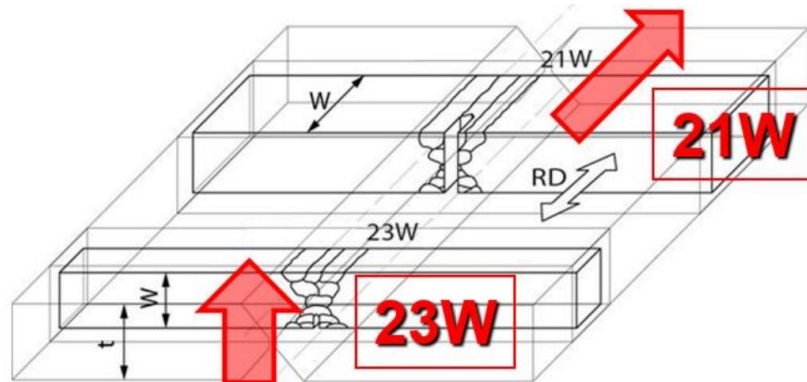
A kísérletekhez alkalmazott védőgáz M21 típusú (80% Ar + 20% CO₂) védőgáz keverék volt, 18 l/min áramlási sebességgel. A hegesztett kötések elkészítéséhez alkalmazott paramétereket és az előmelegítésre ($T_{elő}$), valamint a rétegek közti hőmérsékletre (T_{rk}) vonatkozó információkat az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat. Hegesztési paraméterek [26]–[28]

Alapanyag	Hozaganyag	Sor	$T_{elő}, T_{rk}$ [°C]	I [A]	U [V]	Hegesztési sebesség [cm/min]	Fajlagos hőbevitel [J/mm]
S690QL	NiMoCr	1-2	150, 180	130-145	19,0-20,0	20	610-680
	Union X85 Union X90	3-20		260-275	28,5-29,5	35-40	880,950
S960QL	Union X96	1 / 2	200 / 180	96 / 194	17,3 / 22,0	11 / 27	727 / 764
		3-12	150	298-308	29,0-31,0	45	940-1000
S960M	Union X90	1-2	70, 180	135-150	20,0-20,7	20	675-740
	Union X96	3-8		290-295	27,5-29,0	40	900-1020
	Union X96	1-2	70, 300	135-145	17,5-18,0	20	565-630
	OK Tubrod 14.03	3-8		270-300	27,5-29,0	40	890-1050
S1100M	Union X96	1-2	100, 130	180-190	19,1-19,7	24-27	660-690
	Alform 1100 L-MC	3-8		250-280	25,1-28,7	50-60	620-640
S1300Q	Union X96	1-2	100, 130	180-190	19,1-19,7	30-32	560-582
	Alform 1100 L-MC	3-4		240-250	22,7-23,1	50-55	480-500

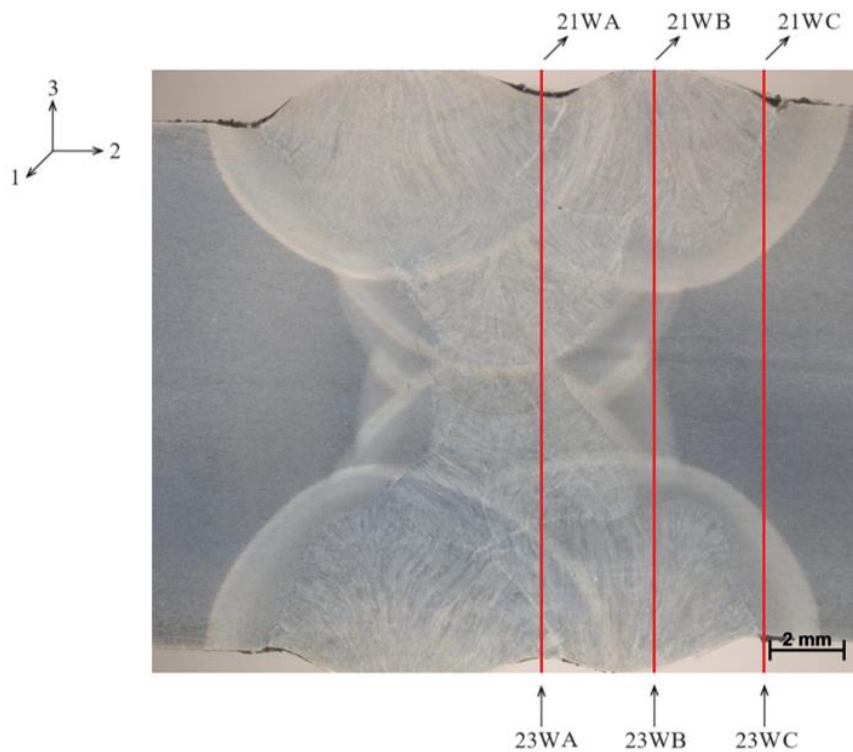
4. Fáradásos repedésterjedés vizsgálatok

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat MTS gyártmányú, univerzális, elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszeren végeztük el. Az alkalmazott vezérlési mód terheléscsökkentés (előfárasztás), illetve állandó terhelésamplitúdójú (repedésterjesztés) volt, $R = 0,1$ terhelés aszimmetria tényezővel és szinusz alakú terhelési függvényvel. Minden vizsgálatot laboratóriumi környezetben, szobahőmérsékleten végeztünk el. A vizsgálatok kezdetén a terhelési frekvencia $f = 20$ Hz volt, amelyet a befejező fázisban $f = 5$ Hz értékre csökkentettünk. A repedésterjedéssel szembeni ellenállás jellemzése céljából a vizsgált alapanyagokból és a különböző hozaganyagokkal készített hegesztett kötések közül három ponton terhelt hajlító próbatesteket (TPB) munkáltunk ki. A hegesztett kötések közül a próbatestek kimunkálása a 3. ábra alapján történt.



3. ábra. Három ponton terhelt hajlító próbatestek kimunkálása a hegesztett kötésekből, a bemetszési irányok jelölésével [28].

A vizsgált alapanyagokból T-L, L-T, T-S, L-S orientációjú, míg a hegesztett kötésekből 21 és 23 orientációjú [29] próbatesteket készítettünk. Hegesztett kötéseknél a bemetszéseket különböző helyekre kerültek, hogy átfogó képet kapjunk a kötés repedésterjedésével szembeni ellenállásáról. A bemetszések elhelyezkedésére látható egy példa a 4. ábrán, az S1100M anyagminőség esetén.

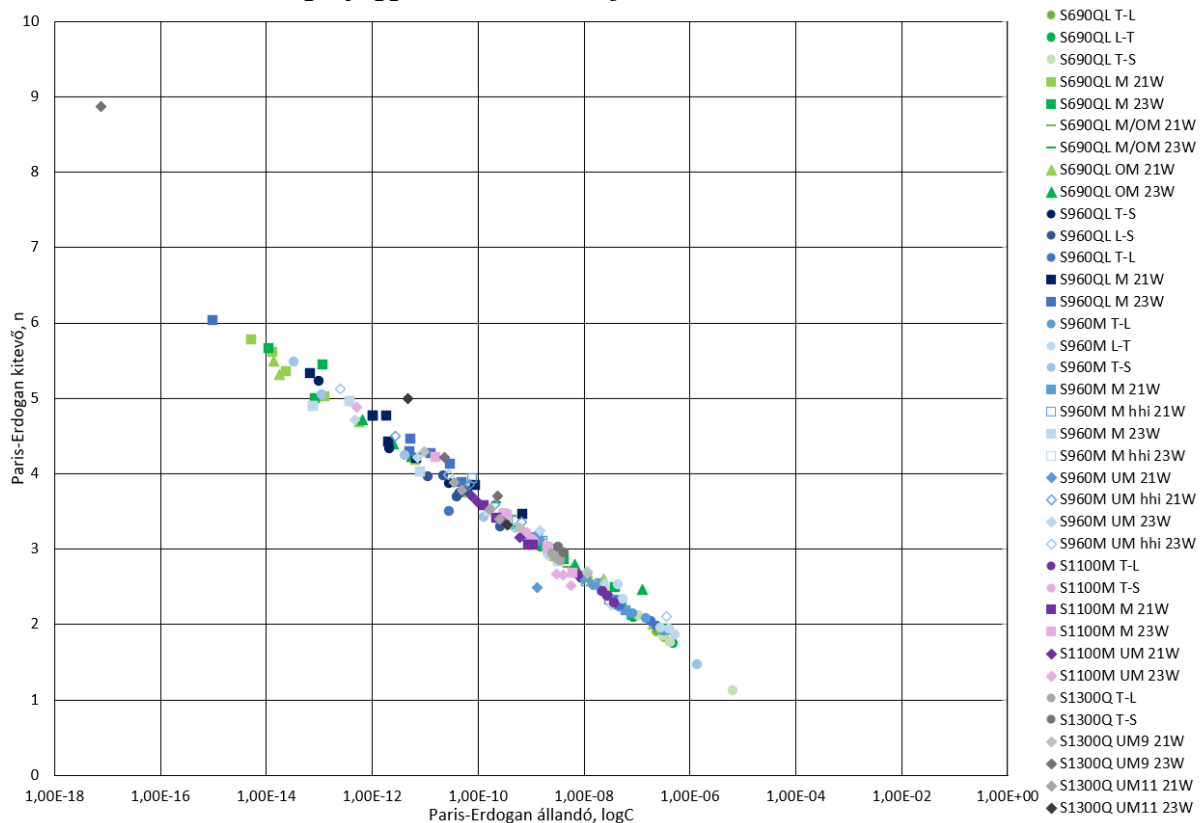


4. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz alkalmazott TPB próbatestek bemetszéseinek orientációja az S1100M acél hegesztett kötéseknél.

Az eredmények megfelelő összehasonlíthatósága érdekében a próbatestek előkészítése minden esetben azonos volt, valamint a vizsgálatok szempontjából meghatározó jellemző próbatest méret (W) névleges értéke is – orientációnként – azonos volt.

A vizsgálatok után a rögzített adatokból megrajzoltuk a repedésméret-igénybevételi szám ($a-N$) görbéket, majd az egyes próbatestek $a-N$ görbéiből származtatott [30] fáradásos repedésterjedésre jellemző kinetikai diagramokat. A kinetikai diagramokból, pedig – a legkisebb négyzetek módszerével – meghatároztuk a Paris-Erdogan összefüggés [31] állandójának (C) és kitevőjének (n) az értékeit.

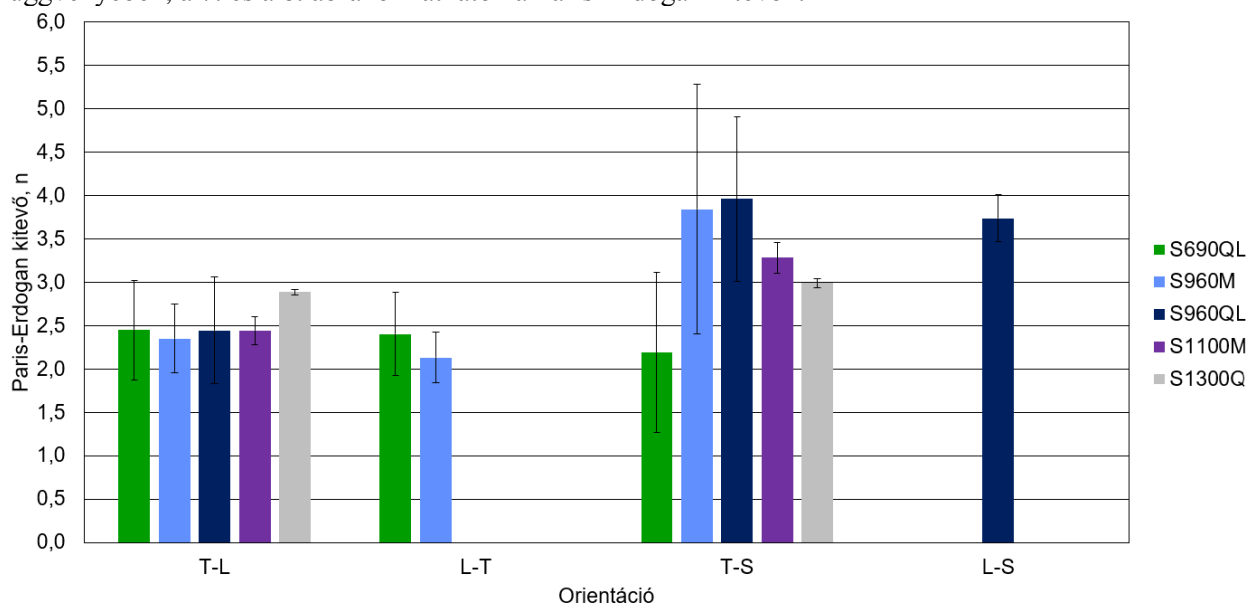
Az 5. ábrán a Paris-Erdogan összefüggés két paraméterének kapcsolata látható, az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján. Az ábrán feltüntettük mind az öt alapanyagot és hegesztett kötéseiken elvégzett vizsgálatok eredményeit. (Az ezen az ábrán és a következő ábrákon a hhi rövidítés a nagy hőbevitelre utal, az S1300Q anyagminőség esetén, pedig az UM9 az Union X96, míg az UM11 az Alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötést jelenti.)



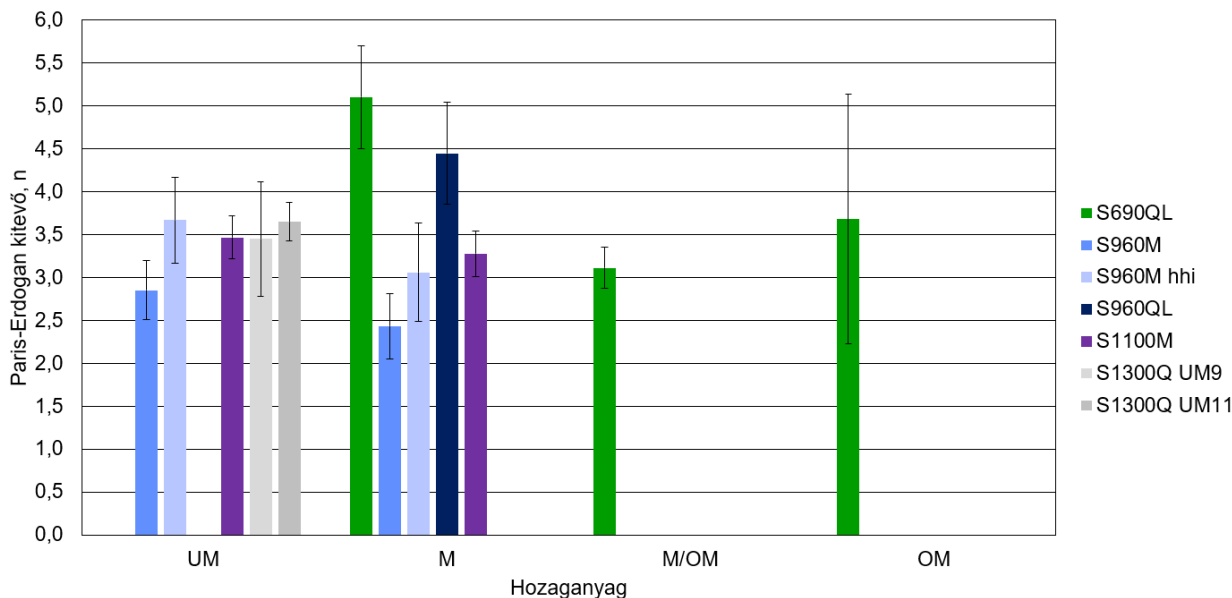
5. ábra. A Paris Erdogan összefüggés két paraméterének kapcsolata a vizsgált alapanyagokon és hegesztett kötéseiken elvégzett vizsgálatok alapján.

Az ábrán látható kapcsolat alapján a vizsgálatok megbízhatóak és jól reprodukálhatóak. A diagramon látható egy „távoli pont”, ami csak a kinetikai diagram első szakaszára vonatkozik, tehát figyelmen kívül hagyható. A kapott eredmények alapján nincs szignifikáns különbség az alapanyag(ok) és a hegesztett kötés(ek) halmazai között, ezért – a későbbiekben – érdemes lehet megvizsgálni a repedésterjedés két szakaszra osztott módszerrel való leírásának a lehetőségét.

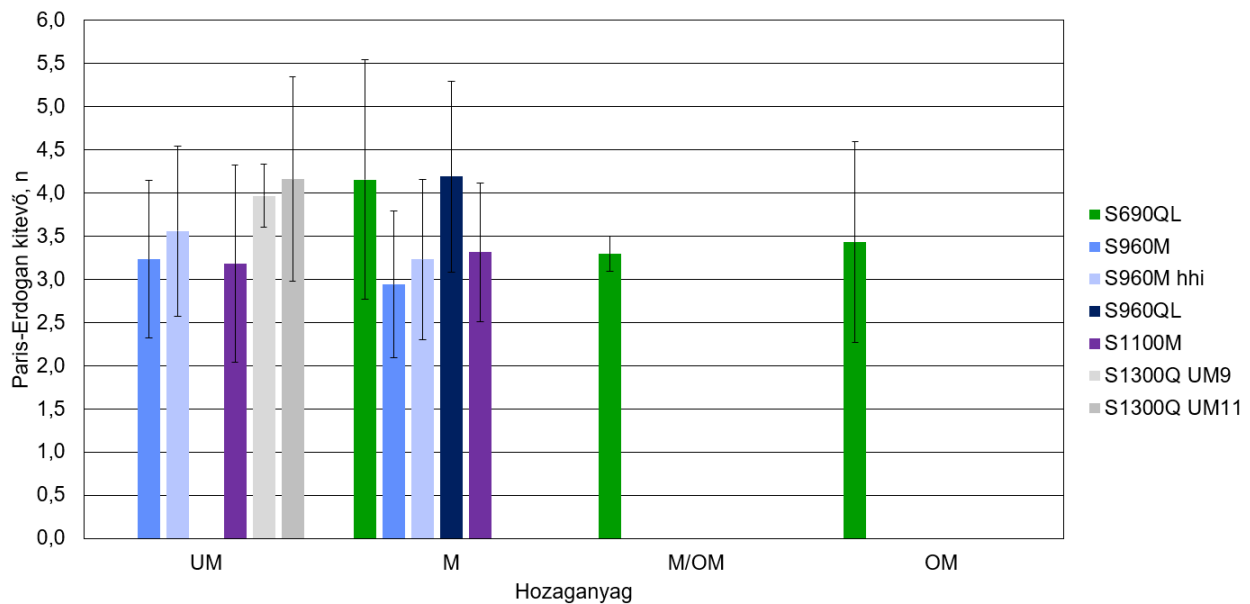
A 6. ábrán a vizsgált alapanyagok esetén láthatók a Paris-Erdogan összefüggés kitevői, a különböző orientációk szerint. A hegesztett kötések esetén pedig, a különböző típusú hozaganyagok függvényében, a 7. és a 8. ábrákon láthatók a Paris-Erdogan kitevők.



6. ábra. A Paris-Erdogan összefüggés kitevői a különböző orientációk szerint, a vizsgált alapanyagok esetén.



7. ábra. A Paris-Erdogan összefüggés kitevői a különböző hozaganyag típusok szerint, a vizsgált hegesztett kötések esetén, 21W irányban.



8. ábra. A Paris-Erdogan összefüggés kitévői a különböző hozaganyag típusok szerint, a vizsgált hegesztett kötések esetén, 23W irányban.

A 6. ábrán bemutatott eredmények alapján a T-L és L-T (lemez síkjában lévő), illetve a T-S és L-S (vastagság irányú) orientációk külön-külön közel állnak egymáshoz, de együttesen már eltérőek. Az acélok a lemez síkjában és a vastagság irányban terjedő repedésekkel szemben eltérően viselkednek. A szórások különbsége is rámutat a vastagság irányú nagyobb inhomogenitásokra.

A hegesztett kötések különböző zónáiban terjedő repedések (együttesen) statisztikailag jellemzik magukat a kötések. A két vizsgált irány (21W és 23W) statisztikailag hasonló viselkedést mutat, közöttük kisebb az eltérés, mint az alapanyagok esetében (21W vs. 23W és lemez síkja vs. vastagság). A vizsgált esetekben a hozaganyag mismatch hatása mindkét irányban (21W és 23W) szignifikánsnak tekinthető. Továbbá, az is szembejövő, hogy a hegesztett kötések eredményeinek szórása nagyobb, mint az alapanyagoké, amely szintén az inhomogenitás következménye.

5. Összefoglalás

A fáradásos repedésterjedés vizsgálatok eredményei alapján a következő megállapítások tehetők.

- A vizsgálatok megbízhatók és jól reprodukálhatók.
- A Paris-Erdogan összefüggés állandója (C) és kitévője (n) alapján
 - a kapcsolat szoros;
 - nincs szignifikáns különbség az alapanyag(ok) és a hegesztett kötés(ek) halmazai között;
 - érdemes megvizsgálni a repedésterjedés két szakaszra osztott (two-stage relationship) módszerrel való leírásának a lehetőségét.
- A Paris-Erdogan kitévő alapján
 - a T-L és az L-T, illetve a T-S és az L-S orientációk külön-külön közel állnak egymáshoz, de együttesen már eltérőek;
 - az acélok a lemez síkjában és a vastagság irányban terjedő repedésekkel szemben eltérően viselkednek;

- a szórások különbsége rámutat a vastagság irányú nagyobb inhomogenitásokra;
- a hegesztett kötések különböző zónáiban terjedő repedések (együttesen) statisztikailag jellemzik magukat a kötések;
- a két irány (21W és 23W) statisztikailag hasonló viselkedést mutat, közöttük kisebb az eltérés, mint az alapanyagok esetében;
- a mismatch hatás mind a 21W és a 23W irányban szignifikánsnak tekinthető;
- a hegesztett kötések eredményeinek szórása nagyobb, mint az alapanyagoké, amely az inhomogenitás következménye.

Irodalom

- [1] A. Akyel, M. H. Kolstein, and F. S. K. Bijlaard, "Fatigue strength of repaired cracks in base material of high strength steels," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 139, pp. 374-384, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.10.005.
- [2] J. Berg, and N. Stranghöner, "Fatigue behaviour of high frequency hammer peened ultra high strength steels," *Int. J. Fatigue.*, vol. 82, no. 1, pp. 35-48, 2016, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.08.012.
- [3] M. St. Weglowski, and M. Zeman, M. Lomozik, "Physical simulation of weldability of Weldox 1300 steel," *MSF.*, vol. 762, pp. 551-555, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.762.551.
- [4] M. St. Weglowski, and M. Zeman, "Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300," *ACME.*, vol. 14, no. 3, pp. 417-424, 2014, doi: 10.1016/j.acme.2013.10.010.
- [5] M. Gáspár, and R. Sisodia, "Improving the HAZ toughness of Q+T high strength steels by post weld heat treatment," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 426, 2018, Art. no. 012012, doi: 10.1088/1757-899X/426/1/012012.
- [6] M. Amraei, A. Ahola, S. Afkhami, T. Björk, A. Heidarpour, and X. L. Zhao, "Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels," *Eng. Struct.*, vol. 198, 2019, Art. no. 109460, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109460.
- [7] H. Tervo, A. Kaijalainen, T. Pikkarainen, S. Mehtonen, and D. Porter, "Effect of impurity level and inclusions on the ductility and toughness of an ultra-high-strength steel," *Mater. Sci. Eng. A.*, vol. 697, pp. 184-193, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.05.013.
- [8] H. Ban, and G. Shi, "A review of research on high-strength steel structures," *Struct. Build.*, vol. 171, no. 8, pp. 625-641, 2017, doi: 10.1680/jstbu.16.00197.
- [9] M. Gáspár, and A. Balogh, "GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steels," *J. Manuf. Process.*, vol. 6, no. 1, pp. 9-24, 2013.
- [10] Zs. Koncsik, "Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches," in: *Proc. SSD., 1st Int. Conf. on Eng. Sol. for Sust. Dev. (ICESSD 2019)*, K. Szita Tóthné, K. Jármái, K. Voith, Eds., Oct. 3-4, 2019, pp. 316-324.
- [11] Zs. Koncsik, "A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban," *Multidiszc. Tud.*, vol. 9, no. 4, pp. 63-71, 2019.
- [12] Zs. Koncsik, "Szerkezetintegritási kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben," *Multidiszc. Tud.*, vol. 11, no. 2, pp. 372-379, 2021.
- [13] M. Gáspár, "Effect of welding heat input on simulated HAZ areas in S960QL high strength steel," *J. Met.*, vol. 9, 2019, Art. no. 1226, doi: 10.3390/met9111226.
- [14] D. A. Porter, "Weldable high-strength steels: challenges and engineering applications," in: *68th IIW Annual Assembly & Int. Conf. of the IIW*, Jul. 2-3, 2015, Helsinki, Finland.

- [15] F. Farrokhi, J. Siltanen, and A. Salminen, "Fiber laser welding of direct-quenched ultrahigh strength steels: evaluation of hardness tensile strength, and toughness properties at subzero temperatures," *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 137, no. 6, 2015, Art. no. 061012, doi: 10.1115/1.4030177.
- [16] M. Amraei, T. Skriko, T. Björk, and X. L. Zhai, "Plastic strain characteristics of butt-welded ultra-high strength steel (UHSS)," *Thin-Walled Struct.*, vol. 109, pp. 227-241, 2016, doi: 10.1016/j.tws.2016.09.024.
- [17] H. Tervo *et al.*, "Comparison of impact toughness in simulated coarse-grained heat-affected zone of Al-deoxidized and Ti-deoxidized offshore steels," *J. Met.*, vol. 11, 2021, Art. no. 1783, doi: 10.3390/met11111783.
- [18] M. Tümer, F. Pixner, R. Vallant, J. Domitner, and N. Enzinger, "Mechanical and microstructural properties of S1100 UHSS welds obtained by EBW and MAG welding," *Weld. World.*, vol. 66, pp. 1199-1211, 2022, doi: 10.1007/s40194-022-01276-7.
- [19] J. Yu, P. Ziehl, B. Zárate, and J. Caicedu, "Prediction of fatigue crack growth in steel bridge components using acoustic emission," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, no. 8, pp. 1254-1260, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.03.005.
- [20] Y. Zhang, S. Wang, G. Xu, G. Wang, and M. H. Zhao, "Effect of microstructure on fatigue-crack propagation of 18CrNiMo7-6 high-strength steel," *Int. J. Fatigue.*, vol. 163, 2022, Art. no. 107027, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107027.
- [21] H. F. Li, P. Zhang, and Z. F. Zhang, "A new fatigue crack growth mechanism of high-strength steels," *Mater. Sci. Eng. A.*, vol. 840, 2022, Art. no. 142969, doi: 10.1016/j.msea.2022.142969.
- [22] M. M. Pedersen, "Improving the fatigue and control performance of loader cranes," PhD theses, Dept. Mech. Eng., Department of Mechanical Engineering, AAU, Aalborg, Denmark, 2011.
- [23] *Hot rolled products of structural steels – Part 1: General technical delivery conditions*, EN 10025-1, 2004.
- [24] *Welding consumables. Wire electrodes, wires, rods and deposits for gas shielded arc welding of high strength steels. Classification*, MSZ EN ISO 16834, 2012.
- [25] *Welding consumables. Tubular cored electrodes for gas-shielded and non-gas-shielded metal arc welding of high-strength steels. Classification*, MSZ EN ISO 18276, 2017.
- [26] Dobosy Á., "Tervezési határgörbék nagyszilárdságú acélokból készült, ismétlődő igénybevételű szerkezeti elemekhez," PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2017.
- [27] Gáspár M., "Nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéstechnológiájának fizikai szimulációra alapozott fejlesztése," PhD értekezés, ATI, ME, Miskolc, Magyarország, 2016.
- [28] H. F. H. Mobark, "Fatigue strength and fatigue crack propagation design curves for high strength steel structural elements," PhD theses, Mater. Sci. Technol., UM, Miskolc, Hungary, 2020.
- [29] *Standard terminology relating to fatigue and fracture testing*, ASTM E1823-21, 2021.
- [30] *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*, ASTM E647-15e1, 2015.
- [31] P. Paris, and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws," *J. Basic Eng.*, Transactions of the ASME, pp. 528-534, 1963.

A 960 MPa SZILÁRDSÁGI KATEGÓRIÁJÚ SZERKEZETI ACÉLOK ÉS HEGESZTETT KÖTÉSEIK NAGYCIKLUSÚ FÁRADÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Sas Illés

Műszaki igazgató, Elektro - MontőrING Kft.

Cím: 5100 Jászberény, Monostori út 22., e-mail: sas@elektromontoring.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A szerkezetek, illetve szerkezeti elemek igen változatos körülmények között üzemelnek, elviselve az őket érő mechanikai, termikus és környezeti igénybevételeket. Mindegyik igénybevétel típus esetében nagy jelentősége van az igénybevételek időbeli lefolyásának. Sokféle módon, például káreset statisztikák segítségével bizonyítható, hogy az ismétlődő terhelések veszélyesebbek a kvázi-statisztikus igénybevételeknél. A különböző szerkezeti elemek egymással való összekötésének, szerkezeté formálásának talán a leggyakoribb módszere a hegesztés. A hegesztés során hő- és mechanikai hatások egyaránt érik az összekötendő elemeket, amelyek hatnak azok ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállására is. A fáradási vizsgálatok leggyakrabban még ma is próbatestes vizsgálatok, az így mért értékektől eltérnek szerkezeti elemekre, különösen pedig a szerkezetekre jellemző fáradási adatok. Ezért célszerű a fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezőket összegyűjteni, rendszerezni, valamint hatásukat legalább tendenciájukban megismerni. Jelen közleményben számba vesszük a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezőket, és egy választott nagyszilárdságú szerkezeti acél csoport minőségei segítségével, példákkal illusztráljuk azokat.

Kulcsszavak: nagyciklusú fáradás, befolyásoló tényezők, nagyszilárdságú acél

Abstract

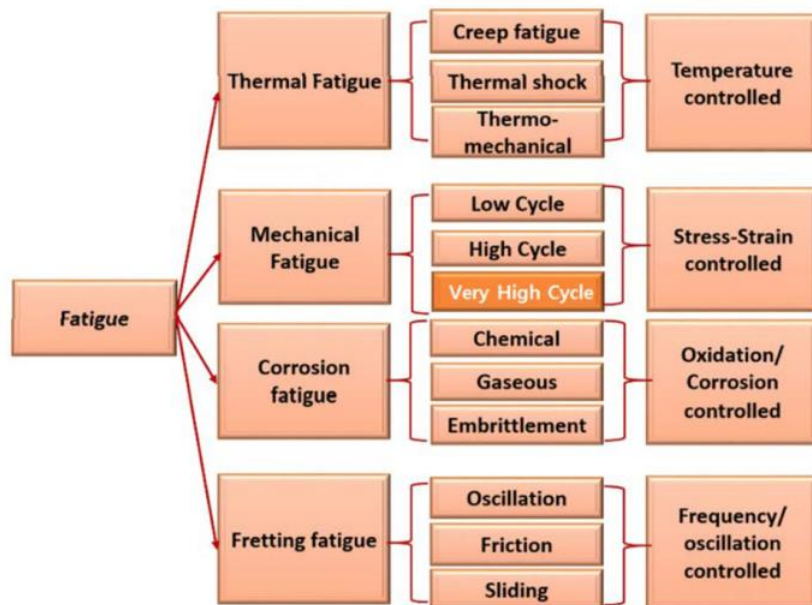
Structures and structural elements operate under a wide range of conditions, withstanding mechanical, thermal and environmental stresses. For each of these types of stresses, the time course of the stresses has a great importance. There are many ways, such as damage statistics, to demonstrate that cyclic stresses are more dangerous than quasi-static stresses. Welding is perhaps the most common method of joining and assembling different structural elements. Welding causes both thermal and mechanical stresses on the elements to be joined, which also affect their resistance to cyclic stresses. Fatigue tests are most often still carried out on specimens, and the fatigue values measured differ from those obtained for structural elements, and in particular for structures. Therefore, it is useful to collect and systematise the factors influencing the results of fatigue tests and to understand their effects, at least in terms of their trends. In the present article, the factors influencing the results

of high cycle fatigue tests are taken into account and illustrated by examples using the qualities of a selected group of high-strength structural steels.

Keywords: high cycle fatigue, influencing factors, high strength steel

1. Bevezetés

A gépészeti szerkezetek, illetve szerkezeti elemek – beleértve az alkatrészeket is – igen változatos körülmények között üzemelnek, elviselve az őket érő mechanikai, termikus és környezeti igénybevételeket. Minden bizonnyal olyan szerkezetből van kevesebb, amelyet csak egy igénybevétel típus terhel, vagyis gyakran van, illetve lehet dolgunk ebben az értelemben is összetett igénybevétellel. Bármely igénybevétel típusról legyen szó, nagy jelentősége van az igénybevételek időbeli lefolyásának. Sokféle módon, igen gyakran káreset statisztikák segítségével (lásd például [1]) bizonyítják be azt, hogy az ismétlődő terhelések veszélyesebbek a kvázi-statisztikus társaiknál, s ami ezt az állítást még hangsúlyosabbá teszi az az a tény, hogy a szerkezetek nagy hányadának a terhelése ciklikus. Az ismétlődő igénybevételek hatására bekövetkező (fáradásos) károsodások egy osztályozását mutatja be az 1. ábra [2]. (Az ultra nagyciklusú (*Very High Cycle*) fáradás kiemelése pusztán az eredeti forrás tartalmára vezethető vissza.)



1. ábra. Az ismétlődő igénybevételek hatására bekövetkező károsodások egy osztályozása [2].

A különböző szerkezeti elemek egymással való összekötésének, szerkezeté formálásának, ha az additív gyártásra is gondolunk, akkor egyes területeken már a gyártásnak is, talán a leggyakoribb módszere a hegesztés. A hegesztés során hő- és mechanikai hatások egyaránt érik az összekötendő elemeket, amelyek hatnak azok ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállására is.

Az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállás leírására számos mérőszám alkalmazható, amelyek alapvetően különböznek, illetve függenek az igénybevételi számtól (kisciklusú fáradás vagy nagyciklusú fáradás) és a leírás módjától (feszültség alapú vagy alakváltozás alapú vagy

törésmechanikai koncepció). Régi és folytonosan visszatérő szándék a releváns mérőszámok összefoglalása, kezdetben nyomtatott kiadványokban, később pedig informatikai alapú megoldásokban. Ezeknek a gyűjteményeknek a célja több módon is megközelíthető:

- közreadni, még inkább közkinccsé tenni a soha nem olcsó ismétlődő igénybevételű vizsgálati eredményeket;
- lehetővé tenni az adatok és az eredmények összehasonlítását, függetlenül attól, hogy azok éppen melyik földrészen keletkeztek, és biztosítani azok matematikai-statisztikai szemléletű feldolgozását;
- kiszorgálni a különböző feladatokat ellátó mérnökök (tervező, üzemeltető) munkáját, alátámasztani méretező és/vagy ellenőrző számításait és növelni azok megbízhatóságát;
- meghatározni olyan tervezési görbéket, amelyek általános alkalmazhatóságukból következően szabványokba foglalhatók;
- megteremteni a fáradási szilárdság előrejelzését (2. ábra) a mesterséges intelligencia módszereinek az alkalmazásával [3]–[5].

Steel Fatigue Strength Predictor

Welcome to the steel fatigue strength predictor. This tool is built using experimental data of more than 400 steels, available from the Japan National Institute for Materials Science (NIMS) MatNavi database. This database consists of processing and composition information of steels, along with the experimentally measured rotating bending fatigue strength (10 million cycles). Various data analytics techniques such as feature selection and regression modeling were used to obtain highly accurate fatigue strength prediction models using a small non-redundant set of six composition parameters and three processing parameters.

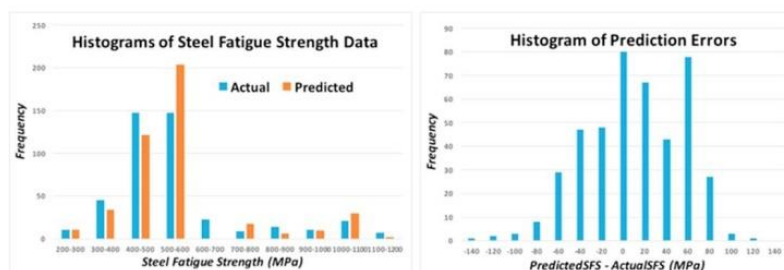
The tool estimates the fatigue strength of the steel based on the composition and processing parameters entered by the user. To obtain the fatigue strength prediction, please enter the attribute values below, and click the submit button.

Carbon (C) (wt %)	0.388	Through Hardening Temperature (°C)	850
Silicon (Si) (wt %)	0.3	Cooling Rate for Through Hardening (°C/hr)	8
Phosphorus (P) (wt %)	0.016	Tempering Time (minutes)	60
Chromium (Cr) (wt %)	0.57		
Copper (Cu) (wt %)	0.068		
Molybdenum (Mo) (wt %)	0.07		

Have more attributes to enter?
Use the [full calculator](#) instead!

Get Steel Fatigue Strength Prediction

Predicted fatigue strength of the given steel = **512.788 MPa**



2. ábra. A fáradási szilárdság előrejelzésének egy lehetősége [5].

Kifejezetten adatokat tartalmazó gyűjteményekre példák – különböző időszakokból – a [6]–[9] könyvek, amelyek közül az elsőre [6] szakirodalmi érdekességként is tekinthetünk, a negyedik pedig az [5] cikkben bemutatott előrejelző módszer egyik alapjának nevezhető. A gyűjteményekben található kifáradási diagramok (Wöhler-görbék vagy S-N görbék) általában közvetlenül használhatók, az azokat befolyásoló tényezők jellemzően közvetlenül „olvashatók ki” belőlük. Különböző szerkezet, illetve

szerkezeti elem csoportokra vonatkozó, szabványokban rögzített tervezési határgörbékét találhatunk például a [10]–[13] előírásokban, amelyek érvényessége a nagyobb (700 MPa-t meghaladó) szilárdsági kategóriájú szerkezeti acélokra csak korlátozottan terjed ki.

Jelen közleményben számba vesszük a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezőket, és egy választott nagyszilárdságú szerkezeti acél csoport (960 MPa-os szilárdsági kategória) minőségei segítségével, példákkal illusztráljuk azokat.

2. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezők

A fáradási szilárdsági görbék és a kifáradási biztonsági diagramok [14] – azokon belül pedig biztonsági területek – többségét kis átmérőjű (7-12 mm), polírozott felületű próbatesteken határozták, illetve határozzák meg. Az így mért értékektől eltérnek az alkatrészekre, szerkezeti elemekre, különösen pedig a szerkezetekre jellemző fáradási adatok, mivel azok méretei, megmunkálásuk, kialakításuk számottevően különbözik a próbatestektől. Ezért célszerű a fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezőket összegyűjteni, rendszerezni, valamint hatásukat legalább tendenciájukban megismerni.

A fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezőket három csoportba lehet sorolni, amelyek a következők:

- a próbatest, alkatrész, szerkezeti elem jellemzői, azon belül
 - méretek,
 - felületi érdesség,
 - a felületi, illetve a felület-közeli réteg tulajdonságai;
- a terhelés jellemzői, azon belül
 - az igénybevétel fajtája,
 - a terhelés aszimmetria tényező,
 - a terhelési frekvencia,
 - a terhelési ciklus alakja,
 - a külső terhelésre szuperponálódó maradó feszültségek,
 - az esetleges túlterhelés hatása;
- a környezet hatásai, azon belül pedig
 - a hőmérséklet hatása,
 - a korróziós közeg szerepe,
 - a bevonat(ok) hatása.

Számos szakirodalom a fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezők között ismerteti a feszültséggyűjtő helyek hatását. A feszültséggyűjtő helyek szoros kapcsolatban vannak az alkatrészek, illetve szerkezeti elemek kialakításával, hegesztett szerkezetek esetében pedig magával a hegesztéssel és a hegesztett kötéssel is. A hegesztett kötések a maradó feszültségek vonatkozásában is külön figyelmet és legalább részben más megközelítést igényelnek.

Másfajta logikában tekinthetjük ezeket a tényezőket külső tényezőknek, mint a fáradás – vizsgálatok esetében fárasztás – körülményeit, és ekkor a belső tényezők azok, amelyek a folyamat során az anyag mikroszerkezetének változásával függenek össze. Az inhomogén anyagszerkezetek esetében – és a hegesztett kötések szükségszerűen ilyenek –, az anyagszerkezeti változások is különbözni fognak, amely tovább erősíti a statisztikai szemlélet alkalmazásának jelentőségét és fontosságát.

A befolyásoló tényezőket, ha nem is azonos módon és azonos mélységben, de minden tárgykörben megjelent monográfia (lásd [15]–[20]) tárgyalja.

3. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményeit befolyásoló tényezők S960 típusú acélok hegesztett kötéseinek esetén

Az áttekintett forrásokban található, 960 MPa szilárdsági kategóriájú szerkezeti acélok legfontosabb jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze, a 2. táblázatban pedig a hegesztéstechnológiával kapcsolatos információk találhatóak. Mivel az eredeti források eltérő módon közölték ezeket az adatokat, így a táblázatok egyes sorai hiányosak.

1. táblázat. A 960 MPa szilárdsági kategóriájú szerkezeti acélok jellemzői az áttekintett forrásokban

Anyagminőség	Állapot	t [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	HV0,5 [-]	Forrás
Q960E	Q+T	10	1020	1120	16	346	[21]
S960	N/A	20	N/A	N/A	N/A	N/A	[22]
S235-S960	eltérő	tompakötés: 1,5-75	-	-	-	-	[23]
	eltérő	keresztmetsz: 3-100					
S960M x-treme	TM	10	1011	1150	N/A	N/A	[24]
S960QL	Q+T	8	1010	1052	9,5	N/A	[25]

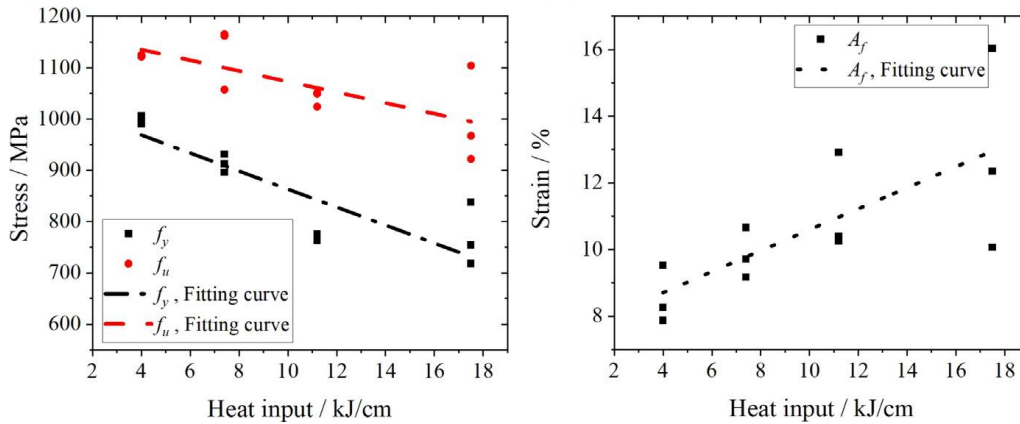
2. táblázat. A 960 MPa szilárdsági kategóriájú szerkezeti acélok hegesztésére vonatkozó információk az áttekintett forrásokban

Anyagminőség	Hegesztő eljárás*	Hozaganyag / Plattírozott réteg	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	HV0,5 [-]	Forrás
Q960E	GMAW	Union X96	930	980	14	N/A	[21]
S960	LC	Al bronz	-	-	-	158	[22]
		Co ötvözet				440	
		316L				155	
		keménykróm				620	
S235-S960	különböző	-	-	-	-	-	[23]
S960M x-treme	GMAW	alform 960-IG	≥ 930	≥ 980	14	N/A	[24]
S960QL	GMAW	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	[25]

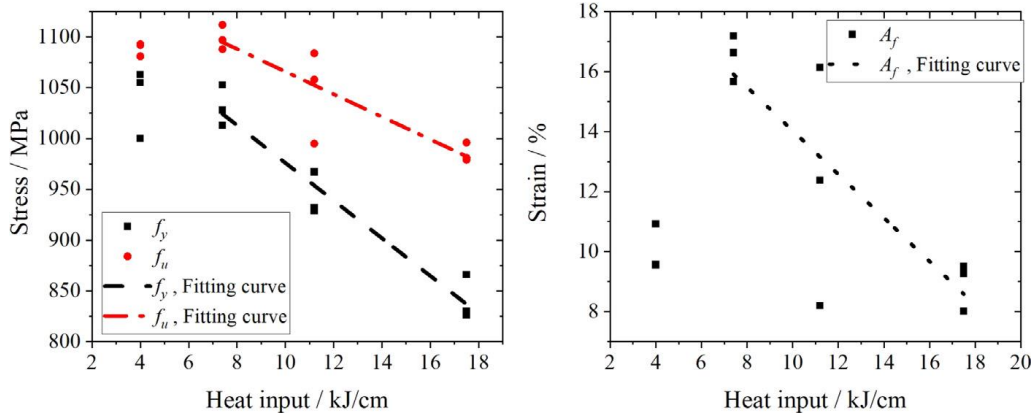
* GMAW: huzalelektrodás, védőgázos ívhegesztés; LC = lézer plattírozás

A [21] cikk szerzői a hegesztési hőbevitel hatását vizsgálták Q960E jelű acél hegesztett kötéseinek alapvető mechanikai tulajdonságaira. Az eredményeket a 3-5. ábrák szemléltetik.

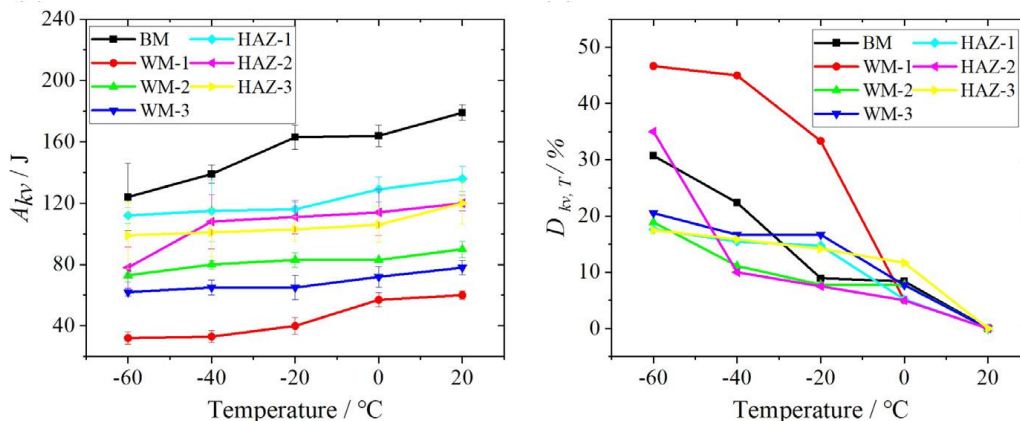
A 3-5. ábrák alapján megállapítható, hogy egyértelmű kapcsolat van a varratfém és a hegesztett kötés szilárdsági és alakváltozási mérőszámai valamint a hőbevitel között. A kapcsolat a szilárdsági mérőszámok esetében szorosabb, a százalékos szakadási nyúlás esetében lazább. A hőbevitel növelése különböző mértékű lágyulást okozott a varratfémekben és a hőhatásövezetben (hegesztett kötésben), az alapanyaghoz képest. A varratfém és a hőhatásövezet ütemmunkája minden hőmérsékleten kisebb volt, mint az alapanyagé, a nagyobb csökkenések a varratfémekben és a nagyobb hőbevitel esetében következtek be. Tekintettel arra, hogy a kvázi-statisztikus szilárdsági mérőszámok és a kifáradási határ között van kapcsolat, a kvázi-statisztikus igénybevétel esetén tapasztalt viselkedésből lehet következtetéseket megfogalmazni a ciklikus igénybevétel esetén várható viselkedésre.



3. ábra. A varratfém folyáshatárának (f_y), szakítószilárdságának (f_u) és százalékos szakadási nyúlásának (A_f) változása a hőbevitel függvényében [21].

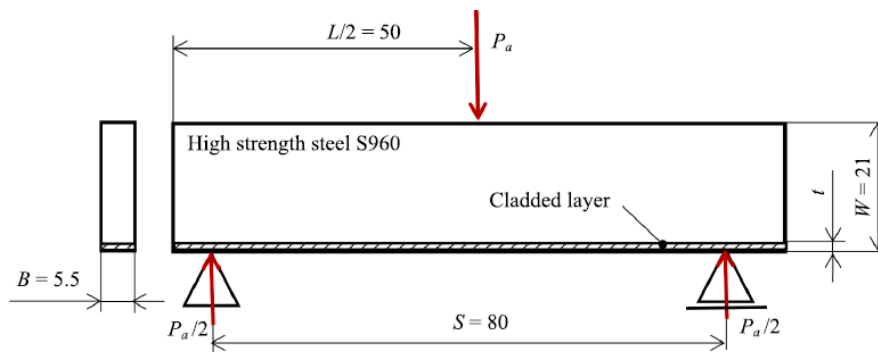


4. ábra. A hegesztett kötés folyáshatárának (f_y), szakítószilárdságának (f_u) és százalékos szakadási nyúlásának (A_f) változása a hőbevitel függvényében [21].

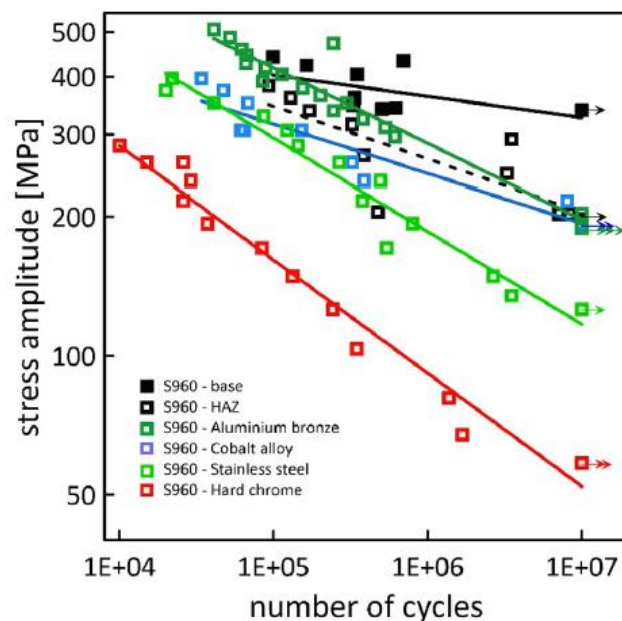


5. ábra. Az alapanyag (BM), a varratfém (WM) és a hőhatásövezet (HAZ) átlagos Charpy-V ütőmunkája (A_{kv}) és az ütőmunka relatív csökkenése ($D_{kv,T}$) a hőmérséklet függvényében – a WM és a HAZ utáni sorszámok a hegesztett kötésekre vonatkozó hőbevitelre jelölik, növekvő sorrendben [21].

S960 jelű acél felületére vittek fel négyféle réteget, lézer plattírozással, majd vizsgálták azok ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállását [22]. A négyféle réteg a következő volt: alumínium-bronz, kobalttötvözet, rozsdamentes acél és keménykróm. A fáradtvizsgálatokhoz használt hárompontos hajlító próbatestet a 6. ábra, az eredményeket pedig a 7. ábra szemlélteti.



6. ábra. Próbatest lézer plattírozással felvitt réteget tartalmazó S960 acél fáradtvizsgálatához [22].



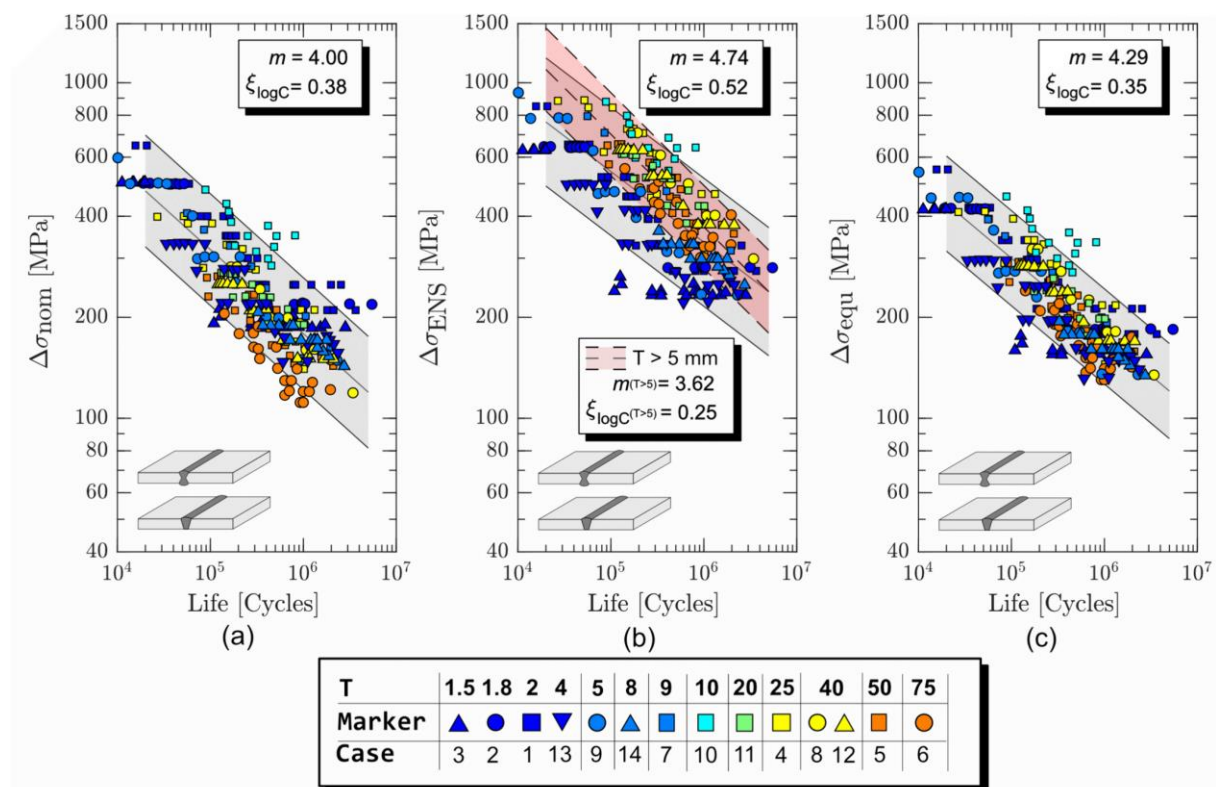
7. ábra. Lézer plattírozással felvitt, különböző felületi rétegeket tartalmazó, S960 jelű acél nagyciklusú fáradtvizsgálatainak eredményei [22].

A 7. ábra alapján megállapítható, hogy mind a négy lézer plattírozott réteg csökkenti az S960 acélból készült próbatestek – ebből következően alkatrészek – fáradási élettartamát. A technológia elkerülhetetlenül létrehozza az (alap)acél hőhatásövezetét, amely különösen a nagyobb ciklusszámok tartományában eredményezi a fáradási élettartam csökkenését. Az alumíniumbronz- és a kobaltrétegek csökkentő hatása kisebb mértékű, és hasonló az acél hőhatásövezetéhez, a rozsdamentes acél alkalmazása esetében ez a hatás 64%-os, a keménykróm esetében pedig még ennél is nagyobb mértékű, 84 %-os. A csökkenések az egyes rétegek közötti határfelületeken kialakuló hibákkal

függenek össze. Mindezek arra hívják fel a figyelmet, hogy egyes tulajdonságok (például kopással szembeni ellenállás, korrózióálló képesség) kedvező változása az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállás kedvezőtlen alakulásával járhat együtt.

A mérethatást a középpontba állítva végeztek elemzést szerkezeti acélok széles tartományán (S235 – S960) a [23] tanulmány szerzői. A vizsgálati eredmények értékelését a névleges feszültség, az effektív (bemetszési) feszültség (a névleges feszültség és a feszültséggyűjtési tényező szorzata) és az ekvivalens vagy valószínűségi feszültség függvényében egyaránt elvégezték. A feldolgozott adatokat és az eredményeket tompakötésekre a 8. ábra, keresztkötésekre pedig a 9. ábra mutatja be. Nyilvánvaló, hogy az adatok ilyen széles tartományára vonatkozó elemzés esetében a mérethatás „tisztá” értékelése nem végezhető el, hiszen a különböző anyagvastagságok hegesztett kötéseit különböző hegesztéstechnológiákat is takarnak.

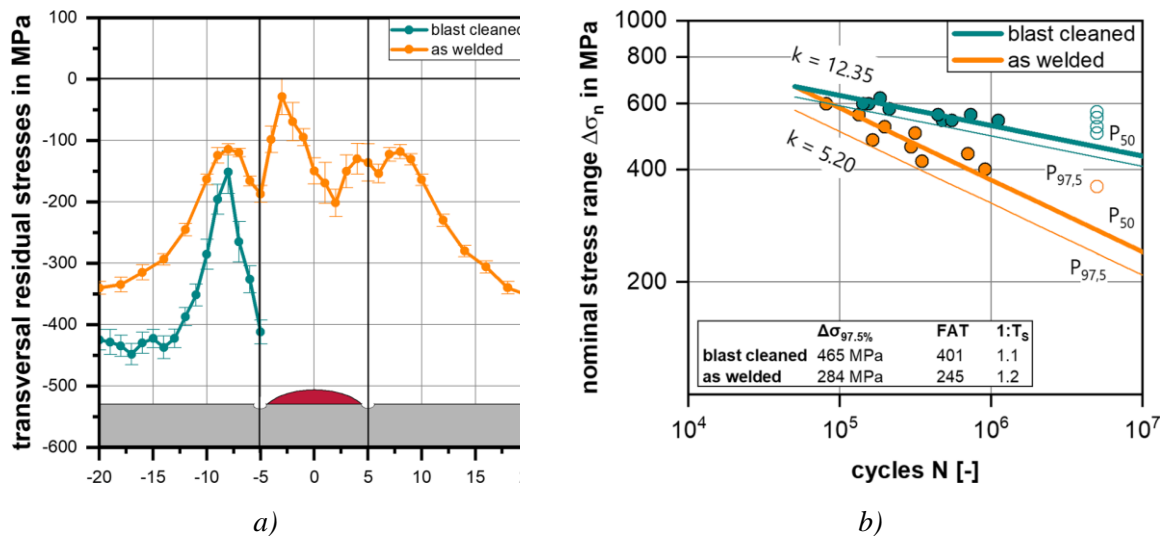
Mindkét ábra megmutatja azt, hogy az alkalmazott értékelési módszer átrendezést eredményez az anyagvastagságok vonatkozásában, amely a vastagság irányú feszültegeloszlással, pontosabban a nagyobb feszültségtartományba eső zónák relatív méretének a különbségével van összefüggésben. Az ekvivalens vagy valószínűségi feszültség módszer csökkenti a szórást a másik két módszerhez képest. Kisebb diszharmonia figyelhető meg az eredmények anyagvastagságok függvényében való (szignifikáns) változása és az egyes előírásokban megadott referencia vastagságok (például 22 mm [12] vagy 25 mm [10]) értékei között.



8. ábra. Fáradási szilárdsági adatok különböző anyagminőségű és különböző vastagságú szerkezeti acélok tompakötéseire [23].

A 10. ábra egyértelműen igazolja az ismert tényt, vagyis a hegesztést követő köszörülés kedvezően befolyásolja a nagyciklusú fáradással szembeni ellenállást. A további, jellemzően alacsonyabb szilárdsági kategóriákra kiterjesztett elemzések azt mutatták, hogy a köszörült esetekben van kapcsolat az alapanyag folyáshatára és a FAT-osztály között, előbbi növekedése utóbbi növekedését is magával vonja.

Egy másik hegesztést követő kezelés, a szemcseszórás hatását vizsgálták a [25] tanulmányban. Az S960QL acél hegesztett kötését grafit bevonatú acél szemcsékkel szórták és vizsgálták a maradó feszültségek eloszlását, valamint a kezelés hatását a nagyciklusú fáradással szembeni ellenállásra. Előbbit a 11. ábra a) részlete, utóbbit pedig annak b) részlete mutatja be.



11. ábra. S960QL jelű acél tompahegesztett kötésének maradó feszültség eloszlása (a) ábrarészlet) és fáradási szilárdsági görbéi (b) ábrarészlet) hegesztett és szemcseszórt állapotokban [25].

A szemcseszórás a varratgeometriát szignifikánsan nem változtatja meg, a felületi keménység növekedését és a nyomó maradó feszültségek létrejöttét vagy növekedését azonban előidézi. A fáradási szilárdság növekedése különösen a nagyobb ciklusszámok tartományában érdemi.

4. Következtetések

Az áttekintett közlemények és az azokban található adatok alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

A nagyciklusú fáradástvizsgálatok eredményeit sok tényező befolyásolja, és azok száma a hegesztett kötések esetében tovább nő.

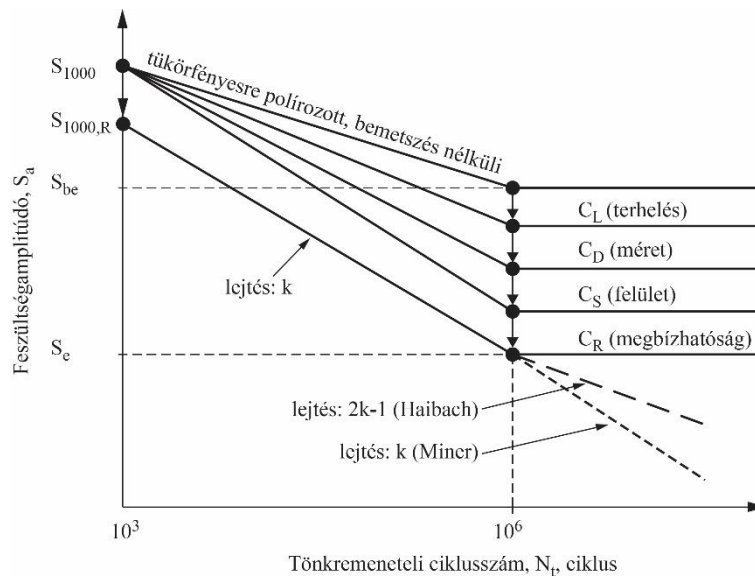
A hegesztéstechnológia és annak paraméterei, mivel azok hatással vannak a kialakuló hegesztett kötés geometriájára, mikroszerkezetére és mechanikai tulajdonságaira, kihatnak a kötések nagyciklusú fáradással szembeni ellenállására.

A fáradási szilárdsági görbék leírására a jól ismert Basquin-féle összefüggés [26] napjainkban is általánosan alkalmazott.

Fáradási szilárdsági görbék alkothatók empirikus összefüggések alapján is (lásd [19]). A módszer próbatestes vizsgálatok adatain és a különböző anyagi mérőszámok között meglévő kapcsolatok

alkalmazásán alapul és annak lényegét a 12. ábra mutatja be. Az ábrán szemléltetett, illetve megnevezett mennyiségek a következők:

- S_{1000} : a fáradási szilárdság értéke 10^3 (1000) ciklusnál;
- $S_{1000,R}$: a fáradási szilárdság megbízhatósággal korrigált értéke 10^3 (1000) ciklusnál;
- S_{be} : forgó-hajtogató kifáradási határ;
- S_e : kifáradási határ;
- C_L : terhelési tényező;
- C_D : a mérethatást kifejező tényező;
- C_S : a felület (felületi megmunkálás) hatását kifejező tényező;
- C_R : megbízhatósági tényező.



12. ábra. Fáradási szilárdsági görbe származtatása empirikus összefüggésekre építve ([1] ábrája, [19] alapján).

A módszer alkalmazása szempontjából meghatározó jellemző a szakítószilárdság, amely lehet szabványos adat, származhat mérésekből, illetve számítható keménységmérések eredményeiből. Az egyes tényezők – közvetlenül vagy közvetetten – visszatükrözik azokat a befolyásoló hatásokat, amelyeket jelen cikk korábbi fejezeteiben kifejtettünk. Kellő mennyiségű és megfelelő megbízhatóságú adat birtokában, a logikai rendet megtartva, az általunk vizsgált esetekre is származtathatók fáradási szilárdsági görbék ezzel a módszerrel, hasonlóan, mint ahogyan azt egy korábbi munkában [27], forrasztott kötésekre bemutattuk.

Irodalom

- [1] J. Lukács, Gy. Nagy, I. Harmati, F. R. Koritárné, and Lné. K. Zs. Kuzsella, *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*, J. Lukács, Ed., Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem, 2012.
- [2] A. Sharma, M. C. Oh, and B. Ahn, „Recent Advances in Very High Cycle Fatigue Behavior of Metals and Alloys – A Review,” *J. Met.*, vol. 10, no. 9, 2020, Art. no. 1200, doi: 10.3390/met10091200.

- [3] T. Shiraiwa, Y. Miyazawa, and M. Enoki, „Prediction of Fatigue Strength in Steels by Linear Regression and Neural Network,” *Mat. Trans.*, vol. 60, no. 2. pp. 189-198, 2019, doi: 10.2320/matertrans.ME201714.
- [4] C. Liu, X. Wang, W. Cai, J. Yang, and H. Su, „Prediction of the Fatigue Strength of Steel Based on Interpretable Machine Learning,” *Materials*, vol. 16, no. 23, 2023, Art. no. 7354, doi: 10.3390/ma16237354.
- [5] A. Agrawal and A. Choudhary, „An online tool for predicting fatigue strength of steel alloys based on ensemble data mining,” *Int. J. of Fatigue*, vol. 113, pp. 389-400, 2018, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.017.
- [6] M. Ros and A. Eichinger, *Die Bruchgefahr fester Körper bei wiederholter Beanspruchung – Ermüdung – METALLE – Ergebnisse der an der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe von 1925-1949 durchgeführten Untersuchungen*. Bericht Nr. 173. Zürich, Svájce: Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, 1950.
- [7] V. T. Troshhenko and L. A. Sosnovskij, *Soprotivlenie ustalosti metellov i splavov*, Kiev, Soviet Union: Naukava Dumka, 1987.
- [8] H. E. Boyer, *Atlas of Fatigue Curves*, Metals Park, OH, USA: American Society for Metals, 1986.
- [9] *Databook on Fatigue Strength of Metallic Materials, Vols. 1-3*, K. Shiozawa et al. Eds. Elsevier Science B. V., 1996.
- [10] *EUROCODE 3 – Acélszerkezetek tervezése. 1-1 rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok*, MSZ EN 1993-1-1, 2009.
- [11] *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Publication Code: LRFDUS-6, Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [12] *Guide to fatigue design and assessment of steel products*, BS 7608:2014+A1, 2015.
- [13] *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, BS 7910, 2019.
- [14] J. Drobni, *Gépelemek III.*, Budapest, Magyarország: Tankönyvkiadó, 1990.
- [15] Á. Zsáry, *Méretezés kifáradásra a gépészetben*, Budapest, Magyarország: Műszaki Könyvkiadó, 1965.
- [16] A. F. Liu, *Structural Life Assessment Methods*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1998.
- [17] J. M. Barsom and S. T. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, ASTM manual series: MNL41, West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1999.
- [18] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, and H. O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [19] Y. L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, and M. Barkey, *Fatigue Testing and Analysis. (Theory and Practice.)*, Amsterdam, Hollandia: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [20] J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, Dordrecht, Hollandia: Springer, 2009.
- [21] S. Gao et al., „Effect of heat input on the mechanical properties of welded Q960E ultra-high strength steel butt joints,” *Eng. Struct.*, vol. 303, 2024, Art. no. 117503, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117503.
- [22] P. Doubek, K. Kozáková, L. Kunz, and S. Seitzl, „Fatigue life of S960 high strength steel with laser clad functional surface layers,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 164, 2024, Art. no. 108629, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108629.

- [23] M. Ghanadi, G. Hultgren, T. Narström, M. Clarin, and Z. Barsoum, „Fatigue assessment of welded joints – size effect and probabilistic approach,” *J. of Constr. Steel Res.*, vol. 221, 2024, Art. no. 108884, doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108884.
- [24] B. Laher, C. Buzzi, P. Brunnhofer, and M. Leitner, „Effect of grinding on the fatigue strength of mild and high strength steel fillet weld joints,” *Results in Eng.*, vol. 22, 2024, Art. no. 102135, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102135.
- [25] T. Werner, T. Nitschke-Pagel, and K. Dilger, „Capability of weld seam improvement techniques for the fatigue strength optimization of welded high strength steels,” *Weld World*, vol. 67, pp. 1575–1580, 2023, doi: 10.1007/s40194-023-01485-8.
- [26] O. H. Basquin, “The Exponential Law of Endurance Tests,” in *Proc. 13th Annu. Meeting, of American Society for Testing and Materials*, Atlantic City, NJ, USA, June 28-July 2, 1910, vol. 10, pp. 625–630.
- [27] Zs. Koncsik and J. Lukács, „Design Curves for High-Cycle Fatigue Loaded Structural Elements,” *Mat. Sci. Forum*, vol. 752, pp. 135–144, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.752.135.

HIDROGÉNNEK KITETT X42, X52 ÉS X100 ANYAGÚ CSŐVEZETÉKEK KÖRVARRATAINAK INTEGRITÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Kovács Judit

Tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: judit.kovacs@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén csővezetékben történő szállítása – legyen szó földgázba kevert hidrogénről vagy tiszta hidrogénről – napjainkban nagy kihívást jelent. Tekintettel arra, hogy gazdasági és környezetvédelmi érdek is fűződik a meglévő földgázszállító rendszer e célra történő felhasználására, érdemes figyelembe venni az integritást befolyásoló tényezőket és azok vizsgálati lehetőségeit. Acél csövek esetén a legjellemzőbb károsodási mód a hidrogén okozta elridegedés, ezért ahhoz, hogy megfelelően átfogó képet kapjunk erről a károsodási módról a következő vizsgálatok elvégzése mindenképpen szükséges: lassú terhelési sebességű szakítóvizsgálat; törési szívósság vizsgálat; nagyciklusú fárasztóvizsgálat; fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálat; teljes csőszakasz vizsgálat és szövetszerkezeti elemzés. Mivel a csővezeték anyaga változó, jelen közleményben az anyagminőség hatása kerül bemutatásra hidrogén környezetben, két hagyományos csővezeték anyag (X42 és X52, mint régebbi anyagok) és egy nagy szilárdságú csővezeték anyag (X100, mint újabb anyag) példáján keresztül.

Kulcsszavak: hidrogén okozta elridegedés, X42 acél, X52 acél, X100 acél, hidrogén szállítás

Abstract

The transport of hydrogen in pipelines – whether it is hydrogen and natural gas mixture or pure hydrogen – is a great challenge nowadays. Considering the economic and environmental interest in using the existing natural gas transmission system for this purpose, it is worth examining the factors affecting integrity and the possibilities to investigate such factors. In the case of steel pipes, the most common type of damage is hydrogen embrittlement, which can be investigated by various test methods. To obtain a sufficiently comprehensive understanding of hydrogen embrittlement, it is essential to carry out the following tests: slow strain rate test; fracture toughness test; high cycle fatigue test; fatigue crack propagation test; full-scale pipeline section test and microstructural analysis. As the materials of pipelines are diverse, in the present publication the effects of material quality in hydrogen environment are investigated using the examples of two conventional pipeline materials (X42 and X52 older) and a high strength pipeline material (X100 newer).

Keywords: hydrogen embrittlement, X42 steel, X52 steel, X100 steel, hydrogen transport

1. Bevezetés

Az olaj- és gázmezők rendelkezésre állásának csökkenésével és a fenntarthatóság iránti igény növekedésével a hidrogén, mint energiahordozó fejlesztése kulcsfontosságúvá vált Európa számára. Ennek egyik legfontosabb lépése a hidrogénszállítási infrastruktúra kialakítása, amelyet a hidrogén biztonságos szállításához teljes körűen meg kell vizsgálni. A hidrogén alacsony energiasűrűsége miatt a hosszú távú szállítás rendkívül költséges lehet. Számos ország rendelkezik kiterjedt, már meglévő földgázvezeték-hálózatokkal, amelyeket a hidrogén szállítására is fel lehetne használni. Ez három lehetséges módon valósítható meg: a hidrogén bekeverésével a meglévő földgázvezeték-rendszerbe; a földgázszállító vezetékrendszer felhasználásával tiszta hidrogén szállítására (utólagos átalakítással); vagy új csővezetékrendszer építésével a tiszta hidrogén szállításához, jellemzően a működő földgázvezetékek mellett. Az ASME B31.12 szabvány [1] használható ilyen csővezetékek tervezéséhez. Ez a szabvány azonban nem tartalmaz teljes részletességű fáradásos repedésterjedési sebesség adatokat és fáradásos károsodási modelleket; a csővezetékek tervezési táblázatai szakítóvizsgálati és ütővizsgálati eredményeken alapulnak. Fáradással kapcsolatos megfelelő mennyiségű információ nem áll rendelkezésre, így ezen információk ismerete hozzájárulhat a szabvány módosításához. Az új és a régi csővezetékek hidrogén szállítására való alkalmasságát új és meglévő csővezetékacélok vizsgálatával és a fáradásos repedésterjedési sebesség meghatározásával lehet ellenőrizni [2]–[10].

A hidrogén szállításához a viszonylag nagy nyomás miatt fém csöveket kell alkalmazni. A szerkezeti anyagok hidrogén okozta mechanikai károsodása a fémek anyagok egyik legösszetettebb jelensége, mivel a károsodási folyamat kinematikája a hidrogén nélküli károsodáshoz képest új, részben ismeretlen. A vasban, az acélban és az egyéb fémötvözetekben oldott hidrogénatomok egyedi tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például változó és eltérő diffúziós képességgel, oldhatósággal és szövetszerkezetre gyakorolt hatással. A hidrogén rontja a fémek anyagok, köztük az acélok mechanikai tulajdonságait. Ennek eredményeként a fém alkatrészek különböző típusú károsodását gyakran a hidrogén jelenléte okozza. A hidrogén okozta károsodás egy általánosan használt kifejezés, amelyet számos fémek anyag károsodási folyamatára és a hidrogénnel való kölcsönhatás különböző mechanizmusaira használnak. A hidrogén okozta károsodás a hidrogén jelenlétében bekövetkező mechanikai meghibásodások széles skáláját foglalja magában, például a meghibásodás típusát, az anyag szerkezeti változásait és a hidrogén-anyag kölcsönhatásokat. A szakirodalomban a hidrogén okozta károsodások mechanizmusait és osztályozását illetően jelentős ellentmondások tapasztalhatók [11]–[13].

A csővezetékekhez használt acéloknak megfelelő hegeszthetőséggel kell rendelkezniük annak érdekében, hogy a varratnak és a hőhatásövezetnek az alkalmazás szempontjából megfelelő szilárdsága és szívóssága legyen. Számos csővezetékacélt állítanak elő különböző termomechanikai kezelésekkel; ezek az eljárások lehetővé teszik nagyobb szilárdságú acélok gyártását sokkal kisebb ötvözet tartalommal, ami kisebb karbonegyeneértéket eredményez, és javítja a hegeszthetőséget. A varratok tulajdonságai is fontosak, mivel a hegesztett kötések szövetszerkezete az alkalmazott hő hatására eltér az alapanyagétól. Továbbá, a hegesztés növeli a hibák, például a zárványok és a porozitás előfordulásának valószínűségét is. Ezek a hibák korlátozhatják a hegesztett cső használhatóságát, valamint a csővezetékek biztonságos üzemeltetése érdekében figyelembe kell venni a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásukat is [8].

Jelen kutatómunka célja, hogy két hagyományos csővezeték anyag (X42 és X52, mint régebbi, a magyar földgázhálózatban széles körben alkalmazott anyagok) és egy nagy szilárdságú csővezeték anyag (X100, mint újabb, a magyar hálózatban még nem alkalmazott anyag) példájának segítségével

elemezzük az anyagminőség hatását a hidrogénszállítás szempontjából, valamint összegezzük a különböző anyagú csővezeték szakaszok hegesztésének hatásait is.

2. A hidrogénszállító csővezetékek integritását befolyásoló tényezők

A különböző csővezetékanyagok hidrogénnel szembeni ellenálló képességének vizsgálatához átfogó kutatásra van szükség. A vizsgálatoknak a következőkre érdemes kiterjedniük:

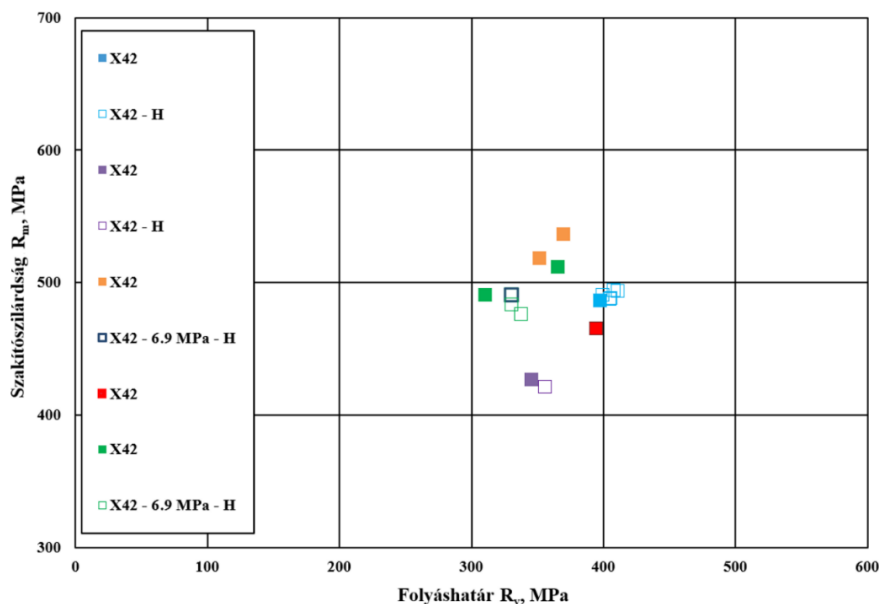
- lassú terhelési sebességű szakítóvizsgálat (SSRT);
- törési szívósság vizsgálat;
- nagyciklusú fárasztóvizsgálat (HCF);
- fáradásos repedésterjedési sebesség (FCG) vizsgálat;
- teljes méretű csőszakasz vizsgálat (*full-scale test*);
- mikroszerkezeti elemzés.

A felsorolt vizsgálatok eredményei alapján különböző lényeges tényezők, mérőszámok és jelleggörbék határozhatók meg a vizsgált anyagok hidrogén szállítására való alkalmasságának megítéléséhez.

Kutatómunkánk során számos nemzetközi szakirodalmat tanulmányoztunk át, és az azokban szereplő vizsgálatok eredményeit felhasználtuk a jelen közleményben szereplő különböző diagramok elkészítéséhez.

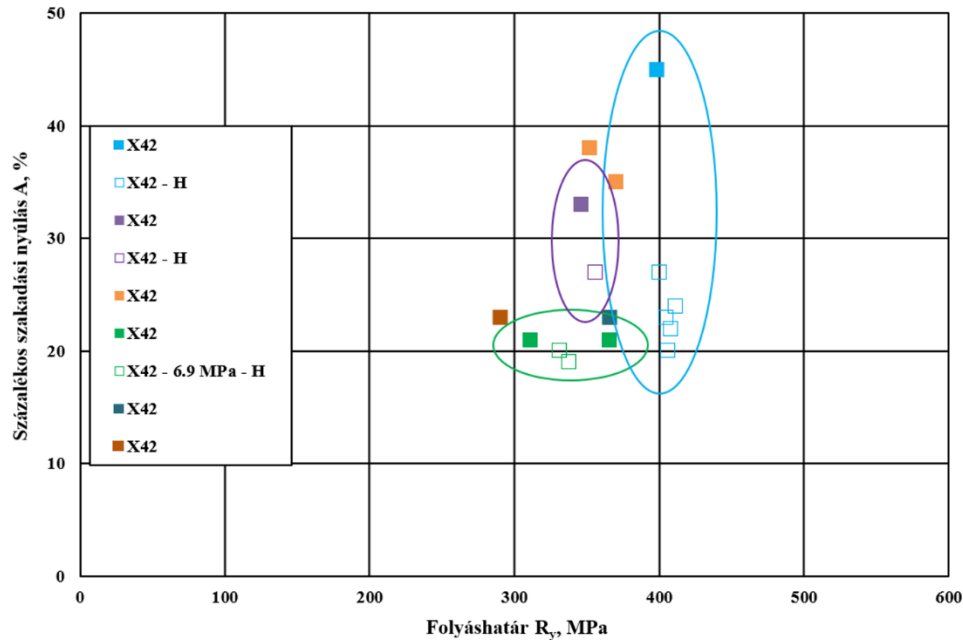
2.1. Lassú terhelési sebességű szakítóvizsgálat (SSRT)

Az 1-3. ábrákon az X42, az X52 és az X100 jelű acélok szakítószilárdság - folyáshatár diagramjai láthatók. A diagramokon számos eredmény szerepel az alapanyagok, a hidrogénnek kitett alapanyagok és a hegesztett kötések vonatkozásában is. A diagramokon a hidrogénnek való kitettséget H-val jelöljük, valamint a hegesztett kötések WJ-vel, a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést pedig GMAW.

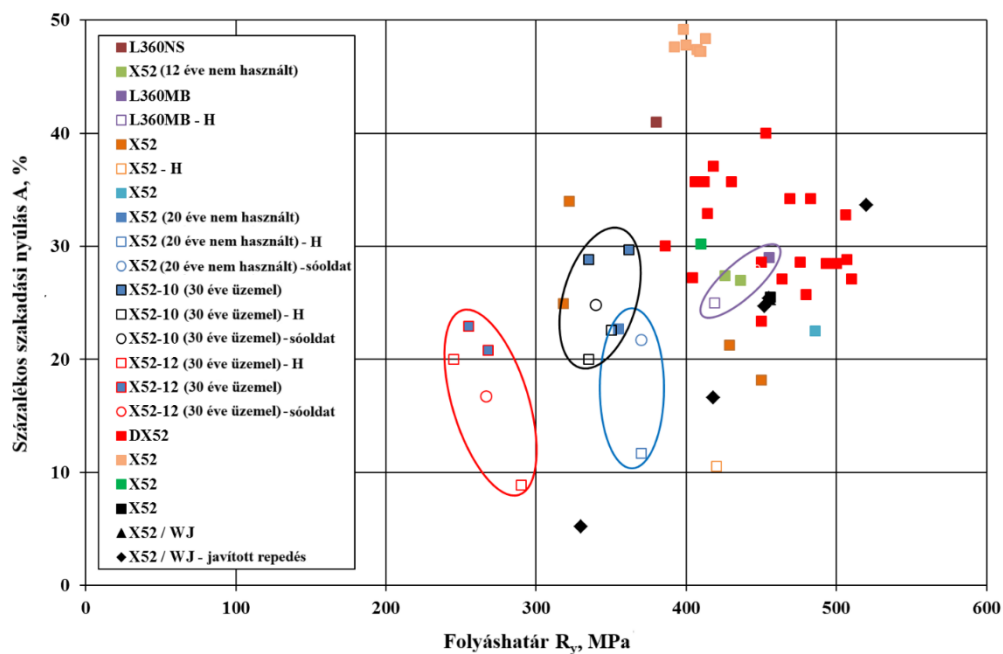


1. ábra. Szakítószilárdság - folyáshatár diagram X42 acél esetén [14]–[20].

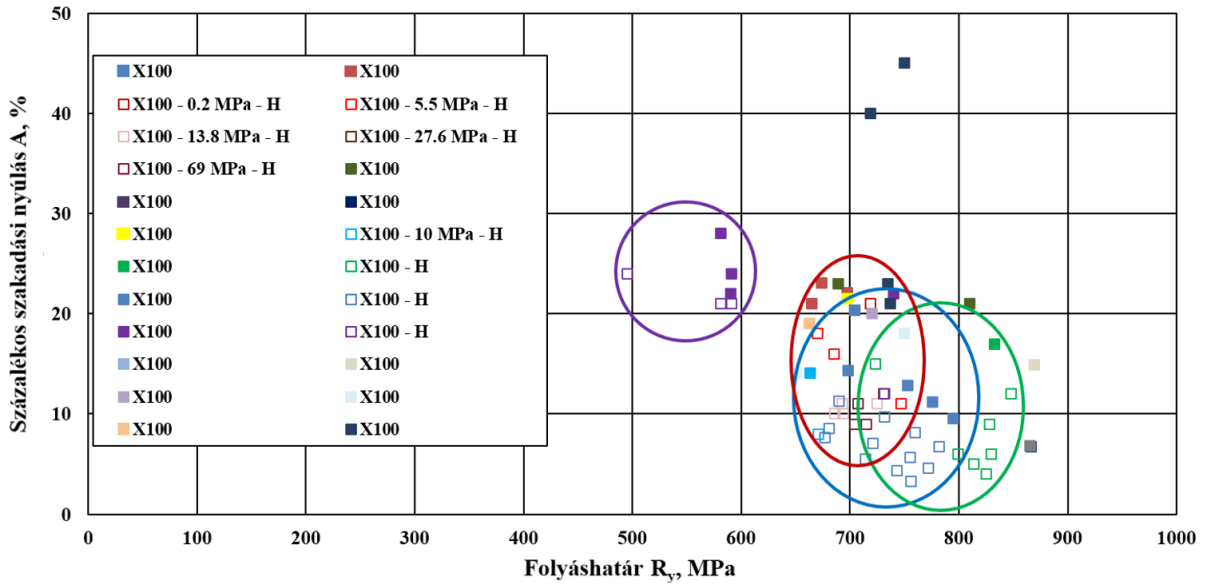
A 4-6. ábrákon a százalékos szakadási nyúlás - folyáshatár diagramok, míg a 7-9. ábrákon a kontrakció - folyáshatár diagramok láthatók.



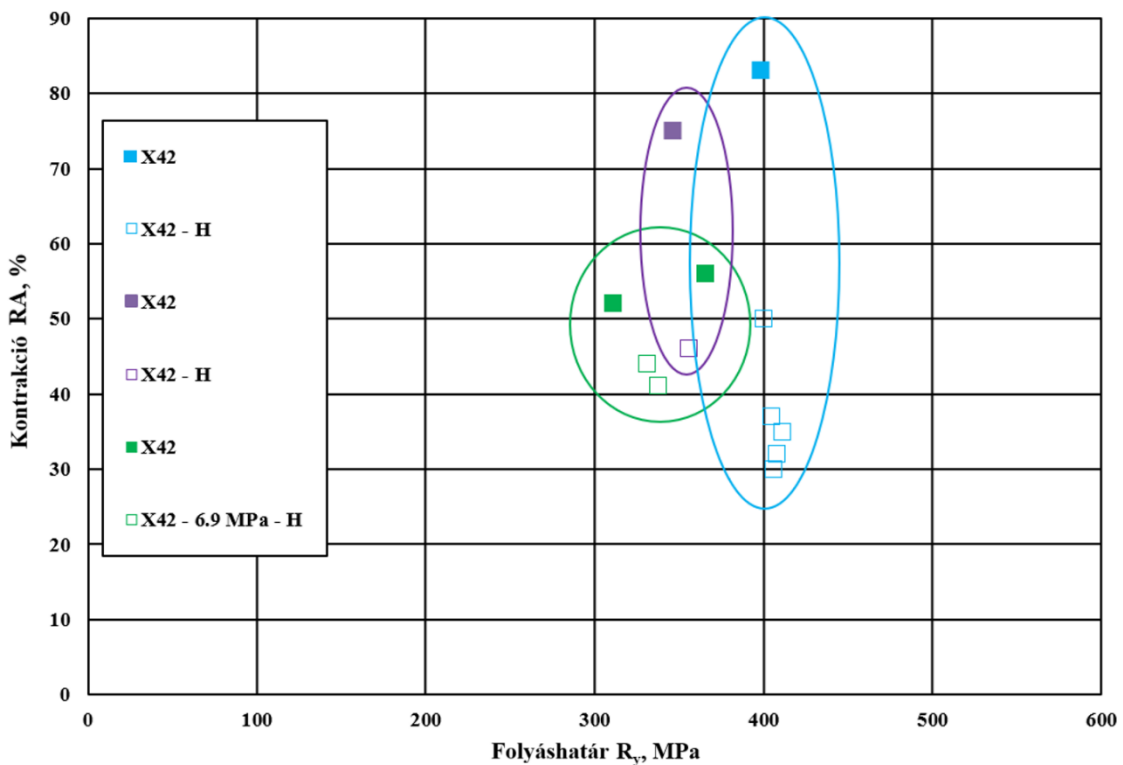
4. ábra. Százalékos szakadási nyúlás - folyáshatár diagram X42 acél esetén [14], [17], [18], [20] [22], [42].



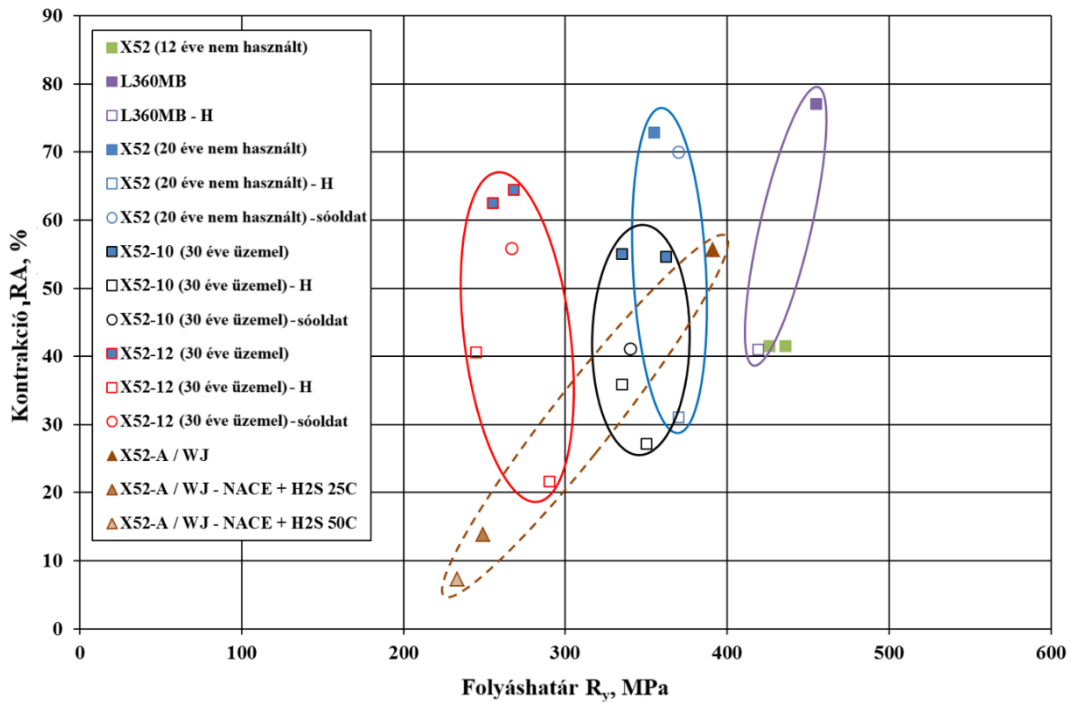
5. ábra. Százalékos szakadási nyúlás - folyáshatár diagram X52 acél esetén [21].



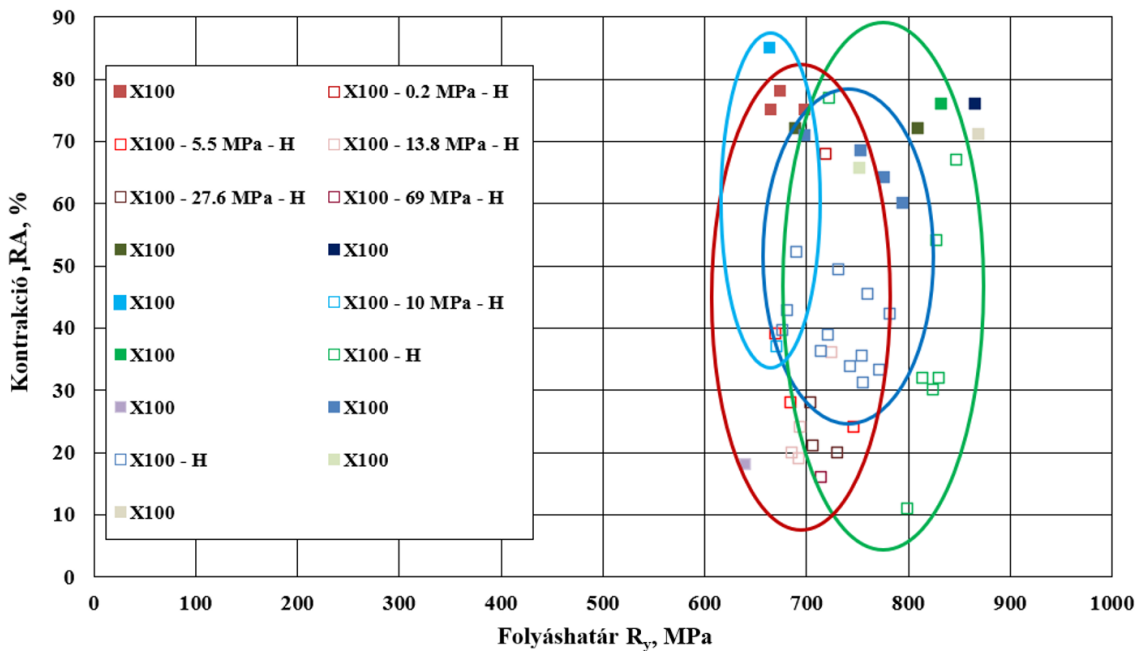
6. ábra. Százalékos szakadási nyúlás - folyáshatár diagram X100 acél esetén [5], [22]–[24], [26], [27], [29], [30], [32], [34]–[37], [39], [41].



7. ábra. Kontrakció - folyáshatár diagram X42 acél esetén [14], [20], [22].



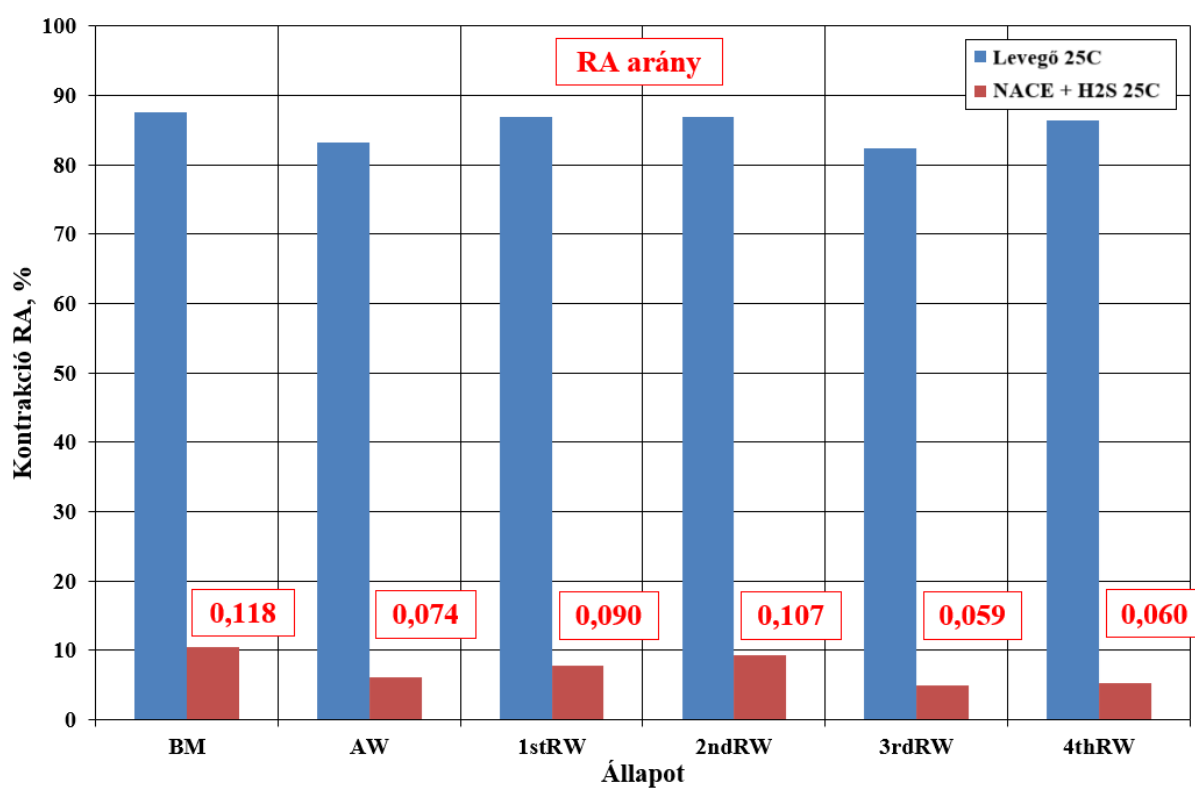
8. ábra. Kontrakció - folyáshatár diagram X52 acél esetén [21].



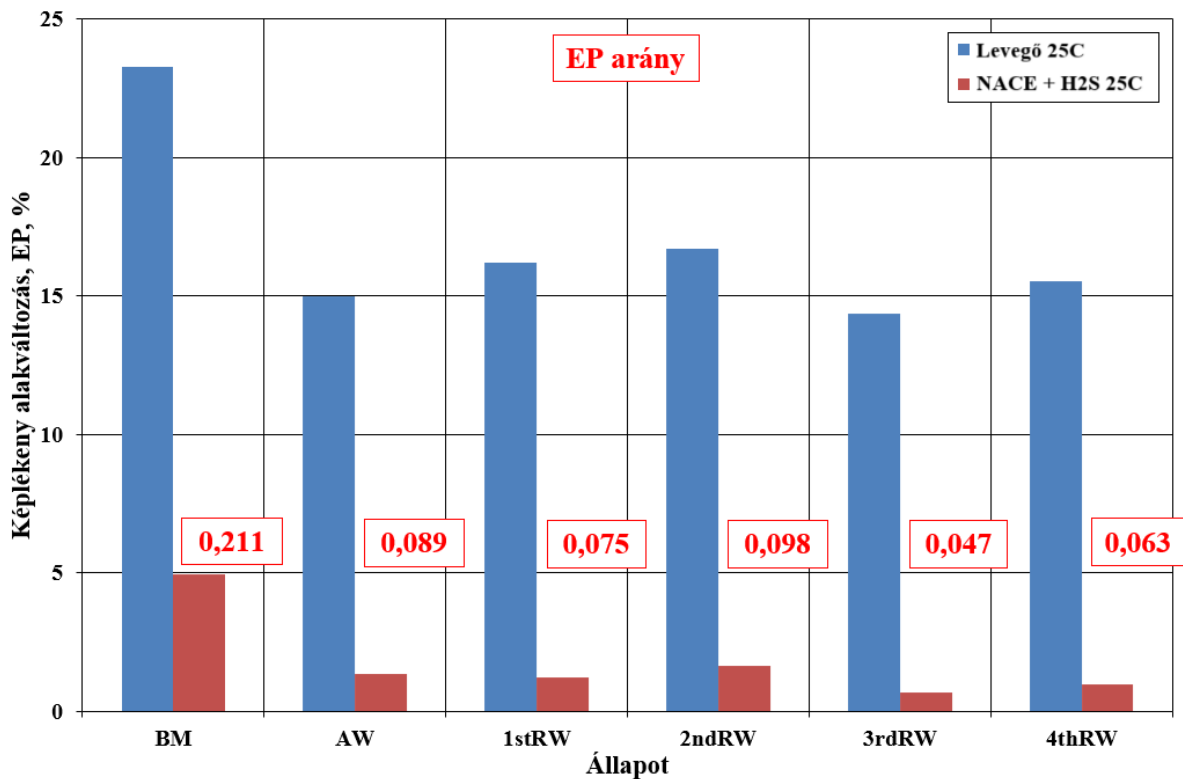
9. ábra. Kontrakció - folyáshatár diagram X100 acél esetén [5], [22], [24], [27], [29], [32]–[34], [37], [38], [40].

Az ábrák jól szemléltetik (az anyagminőségtől függetlenül), hogy a szakítószilárdság esetében nincs egyértelmű változás, de a nyúlás és a kontrakció esetén a hidrogén negatív hatása egyértelműen megfigyelhető. A vizsgált esetekben a hidrogén okozta csökkenés jelentős. Hegesztett kötések esetén is vannak példák, amelyek eredményei alapján látható, hogy a legkisebb értékeket a hegesztett kötések esetén mérték.

Contreras és szerzőtársai a többszöri javítás hatását vizsgálták X52 acélok körvarratai esetén. A kutatómunka során az alapanyagot (BM), négy különböző javítást huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel (1-4.RW) és egy hegesztett (AW) próbatestet vizsgáltak SSRT segítségével. A vizsgálatokat levegőben és H₂S-oldatban végezték szobahőmérsékleten. A 10-11. ábrákon a kontrakció és a tönkremenetelhez tartozó képlékeny alakváltozás aránya látható, a vizsgálatok eredményei alapján [43].



10. ábra. Kontrakció X52 alapanyag és hegesztett kötései esetén [21].

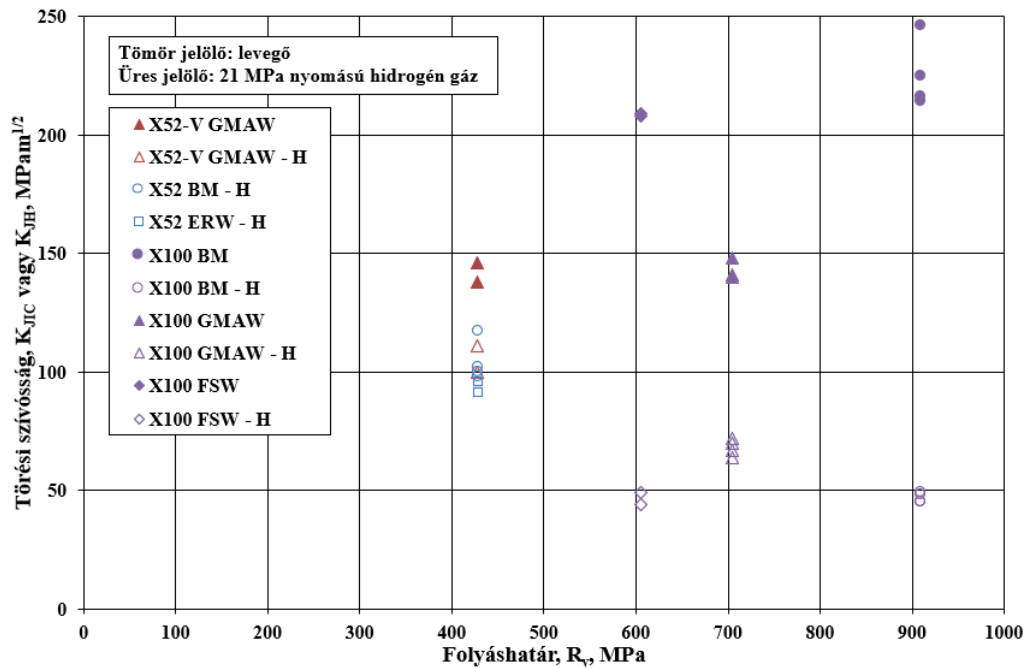


11. ábra. A tönkremenetelhez szükséges képlékeny alakváltozás X52 alapanyag és hegesztett kötéseinek esetén [21].

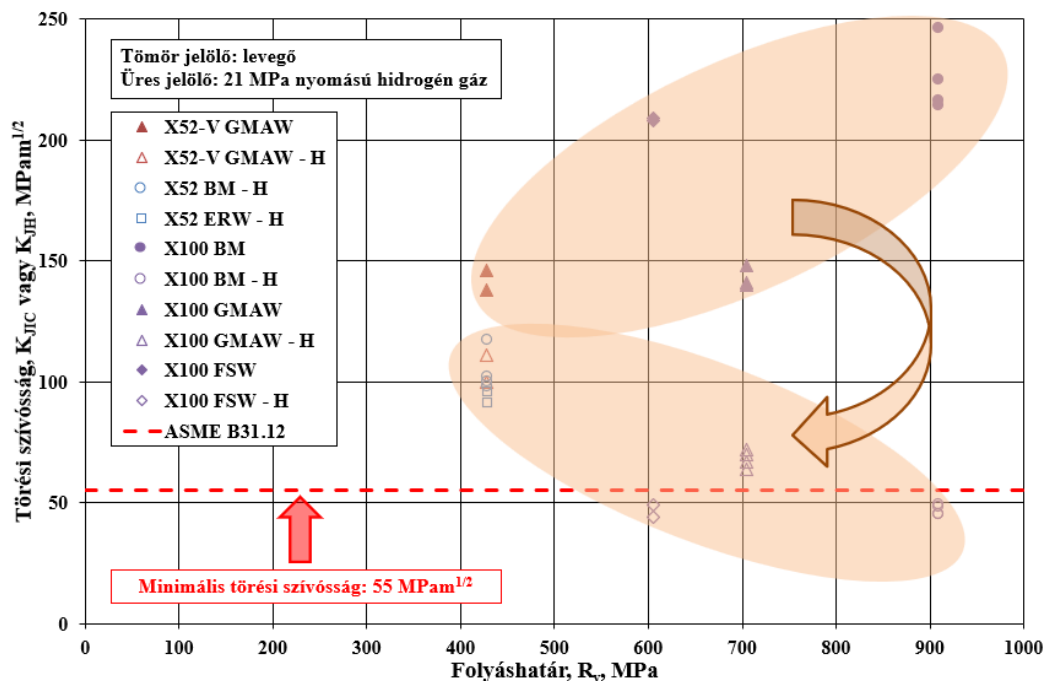
A levegőben végzett kísérletek eredményei alapján a kontrakció tekintetében nem volt jelentős különbség, viszont a tönkremenetelhez tartozó képlékeny alakváltozás kisebb volt a körvarratoknál, mint az alapanyag esetén. Mindkét diagram jól szemlélteti, hogy a mért értékek jelentősen csökkentek a H₂S-oldat kedvezőtlen hatása következtében.

2.2. Törési szívósság vizsgálat

Ronevich és munkatársai különböző technológiával hegesztett X52 és X100 anyagú csővezetékek varratainak törési szívósságát vizsgálták levegőben és 21 MPa nyomású hidrogén gázban. Az alkalmazott hegesztőeljárások a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés, az ellenálláshegesztés (ERW) és a kavarási dörzshegesztés (FSW) voltak [44]. A vizsgálatok eredménye a 12. ábrán, a megfigyelhető tendencia pedig a 13. ábrán látható, amely a minimális törési szívóssági értéket ($55 \text{ MPam}^{1/2}$) is tartalmazza az ASME B31.12 szabvány [1] alapján.



12. ábra. A törési szívósság a folyáshatár függvényében különböző alapanyagok és hegesztett kötéseik esetén, hidrogénnel és hidrogén nélkül [21].

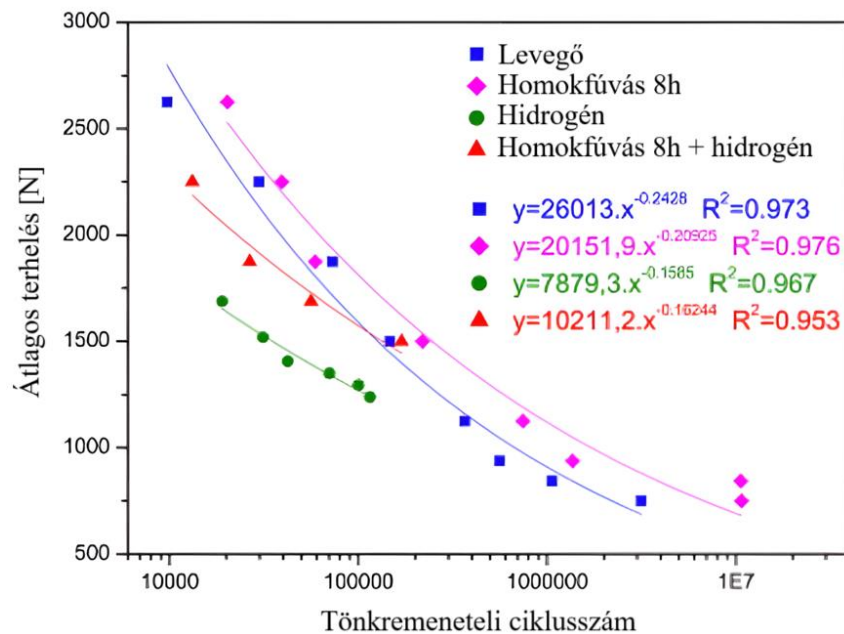


13. ábra. A törési szívósság változásának tendenciája a folyáshatár függvényében különböző alapanyagok és hegesztett kötéseik esetén, hidrogénnel és hidrogén nélkül [21].

Az eredmények alapján egyértelműen megállapítható, hogy a hidrogénnek minden vizsgált esetben negatív hatása volt. Mind az alapanyagok, mind a hegesztett kötések esetén a hidrogén hatására csökkent a törési szívósság. Az ábrán az is megfigyelhető, hogy a törési szívósság csökkenésének mértéke a folyáshatár növekedésével nő. Továbbá az is látható, hogy a hidrogénnek kitett próbatestek törési szívóssága nem éri el az ASME B31.12 [1] szabványban meghatározott minimális értéket.

2.3. Nagyciklusú fárasztóvizsgálat

A hidrogénnek kitett szerkezetek esetén azt is fontos megvizsgálni, hogy a hidrogén hogyan változtatja meg a Wöhler görbét. A nagyciklusú fáradással kapcsolatban Alhussein és szerzőtársai a hidrogén hatását vizsgálták az X52 acél élettartamára vonatkozóan. (A kísérletekben nemcsak a hidrogén, hanem a homokfúvás hatását is vizsgálták.) A 14. ábra a vizsgálatok eredményeit mutatja be az átlagos terhelés és a tönkremeneteli ciklusszám függvényében [45].



14. ábra. Wöhler görbék X52 anyagminőség esetén [45].

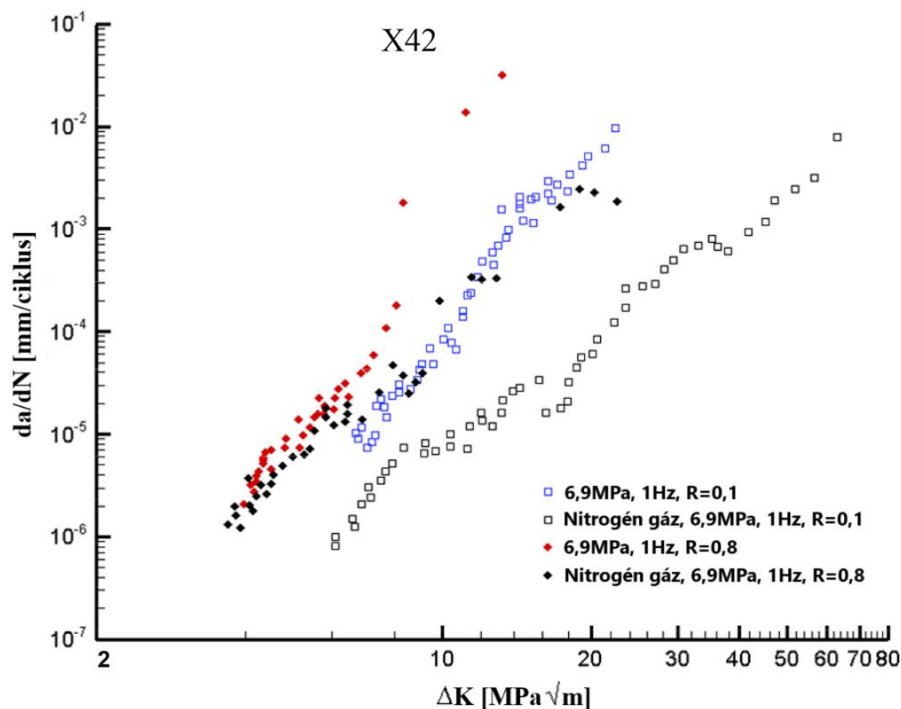
Ha összehasonlítjuk a hidrogénnek kitett próbatestek élettartam görbéjét a levegőn vizsgált próbatestekével, akkor jól megfigyelhető a hidrogén negatív hatása. A vizsgált esetben a hidrogén csökkenti az élettartamot. Az anyag élettartamának jelentős csökkenését a hidrogén jelenléte okozza az acél belsejében, ami az anyag ridegségét eredményezi, így már kis erőhatás is elegendő repedés kialakulásához [45]. A 14. ábra a homokfúvás kedvező hatását mind levegő, mind hidrogén közeg esetén egyaránt bemutatja, nem szabad azonban megfeledkezni arról, hogy a technológiának megvalósíthatósági korlátai és költség kihatásai is vannak.

2.4. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálat

A hidrogén felgyorsíthatja a szénacélok fáradásos repedésterjedési sebességét. A hidrogén a levegőhöz vagy semleges környezethez viszonyítva körülbelül egy nagyságrenddel növelheti a fáradásos

repedésterjedési sebességet, már 1 atm hidrogén gáz nyomáson is. Számos paraméter, például a nyomás, a terhelés aszimmetria tényező (R) és a ciklusok frekvenciája is befolyásolhatja a repedésterjedési sebességet hidrogén esetén [46]. Általánosságban kijelenthető, hogy a hidrogén gáz nyomásának növekedése növeli a repedés terjedési sebességét. és ez a hatás az alacsonyabb feszültségintenzitási tényező tartományokban jelentősebb [47].

Dadfarnia és munkatársai a hidrogén földgázhoz keverésének hatását vizsgálták valós gáznyomás-ingadozások mellett, X42 és X52 acélokon végzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokkal. A 15. ábrán az X42 acél esetén 6,9 MPa hidrogén (és nitrogén) gáz alkalmazásakor láthatók a vizsgálatok eredményei ($R = 0,1$ és $R = 0,8$) [47].

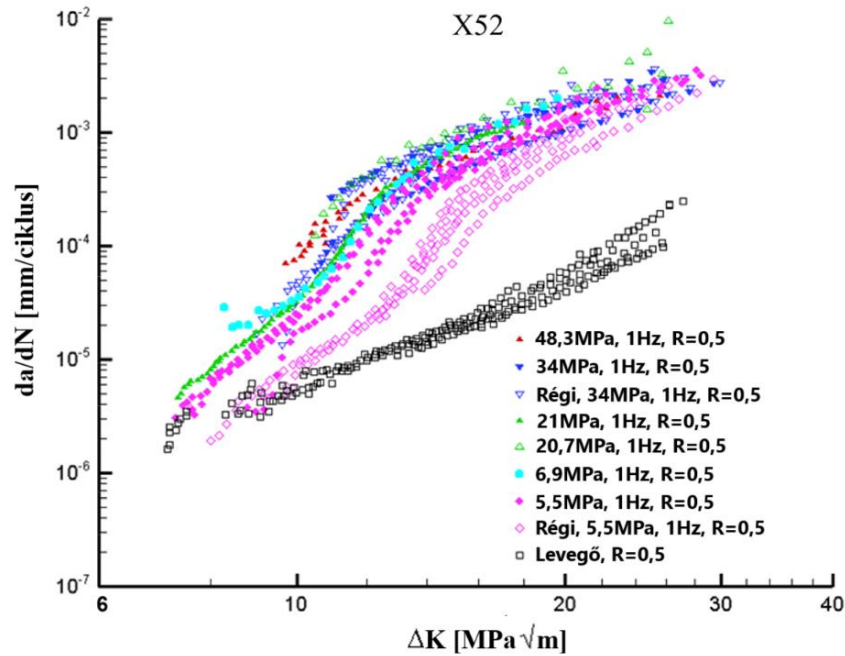


15. ábra. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok da/dN - ΔK görbéi X42 jelű acél esetén [47].

Az eredmények alapján a hidrogén egyértelműen felgyorsítja a fáradásos repedés növekedését a teljes tartományban, $R = 0,1$ esetén. $R = 0,8$ alkalmazásakor, amely a valóságos nyomásváltozásokat jobban közelíti, megjelenik a terhelés aszimmetria tényező szignifikáns hatása.

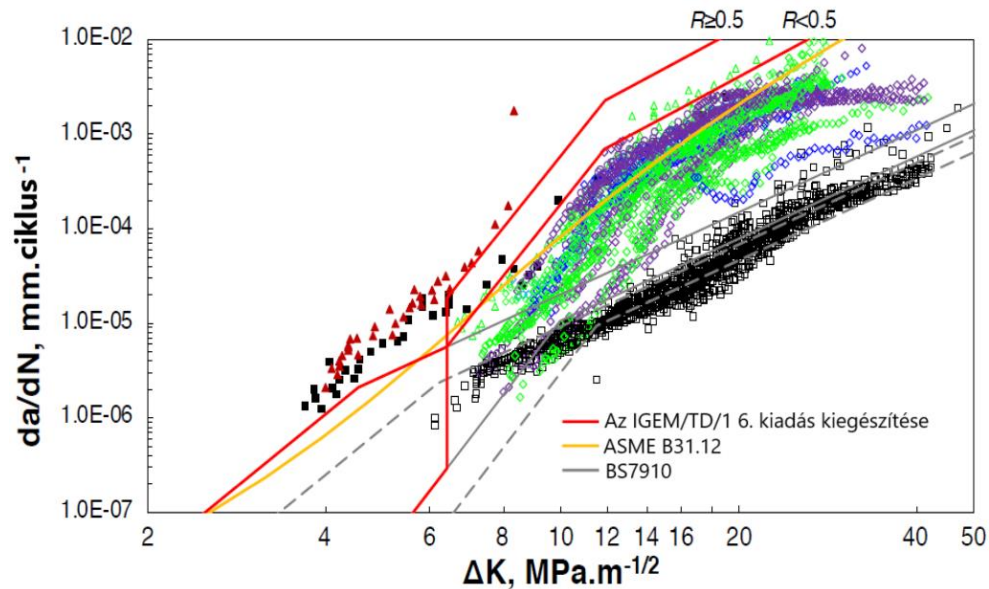
A 16. ábrán régi és új X52 acélok fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatainak az eredményei láthatók, különböző hidrogénnyomás mellett, $R = 0,5$ értékkel.

A hidrogénnyomásának a fáradásos repedésterjedésre gyakorolt hatása 20 MPa-nál volt a legjelentősebb. Az új és a régi X52 acél összehasonlításakor megfigyelhető, hogy a régi X52 acél esetében 5,5 MPa nyomáson alacsonyabb volt a repedésterjedési sebesség, 34 MPa nyomáson azonban mindkét esetben hasonlóak voltak az értékek [48].



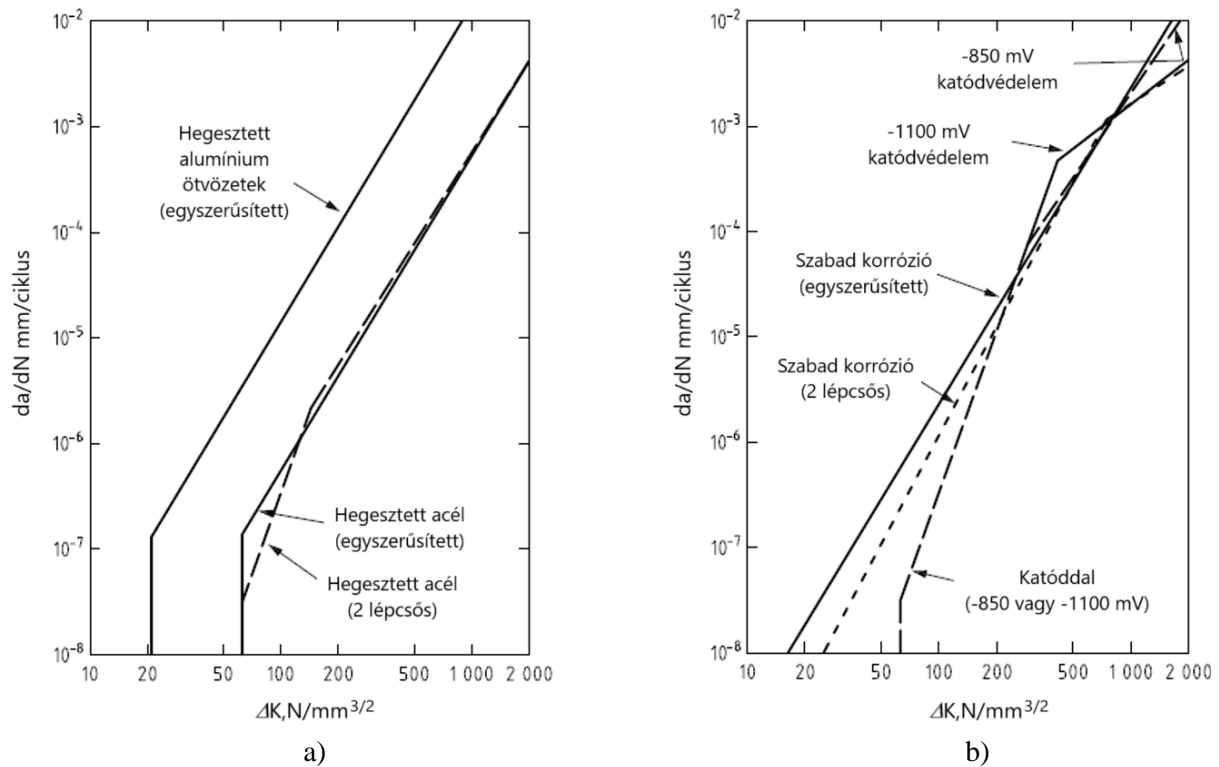
16. ábra. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok da/dN - ΔK görbéi régi és új X52 jelű acél esetén [47].

A 17. ábra a mérési adatokat és a különböző szabványokban/előírásokban foglaltak alapján javasolt fáradásos repedésterjedési sebesség határgörbéket mutatja.



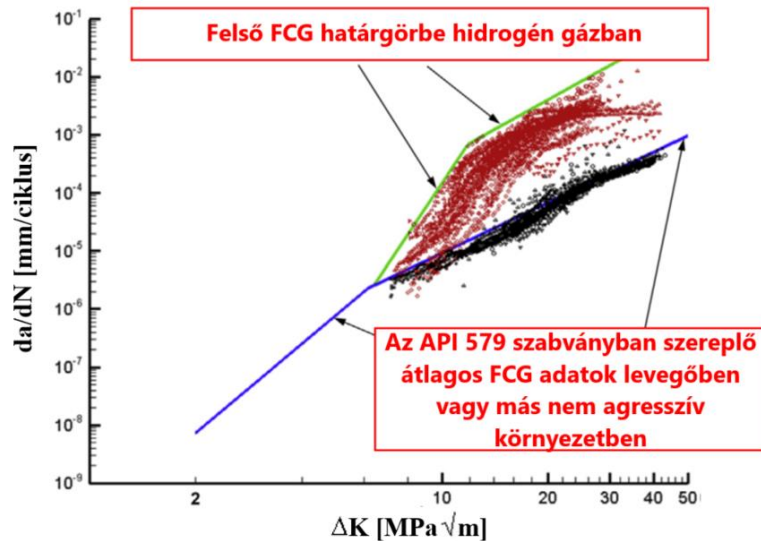
17. ábra. Mért fáradásos repedésterjedési sebesség adatok és különböző szabványok/előírások határgörbékre vonatkozó javaslatai [48].

Az ábrán a pirossal jelölt vonalak az anyagra vonatkozó előírások, ha $R < 0,5$, de hosszvarrat és körvarrat esetén $R \geq 0,5$ értéket kell figyelembe venni. Az ábrán az is látható, hogy az ASME B31.12 előírásai nem fedik le az $R \geq 0,5$ -re vonatkozó részt [48]. A BS7910 szabványban nagyobb ΔK értékek szerepelnek, mint a másik két ábrázolt esetben. A 18. ábrán a BS 7910 szabvány [49] által javasolt fáradásos repedésterjedési sebesség határgörbék láthatók.



18. ábra. Javaslatok fáradásos repedésterjedési sebesség határgörbékre: a) levegőben és más nem agresszív környezetben történő üzemelés, b) hegesztett acélok (beleértve tengeri környezetben az ausztenites acélokat is) [49].

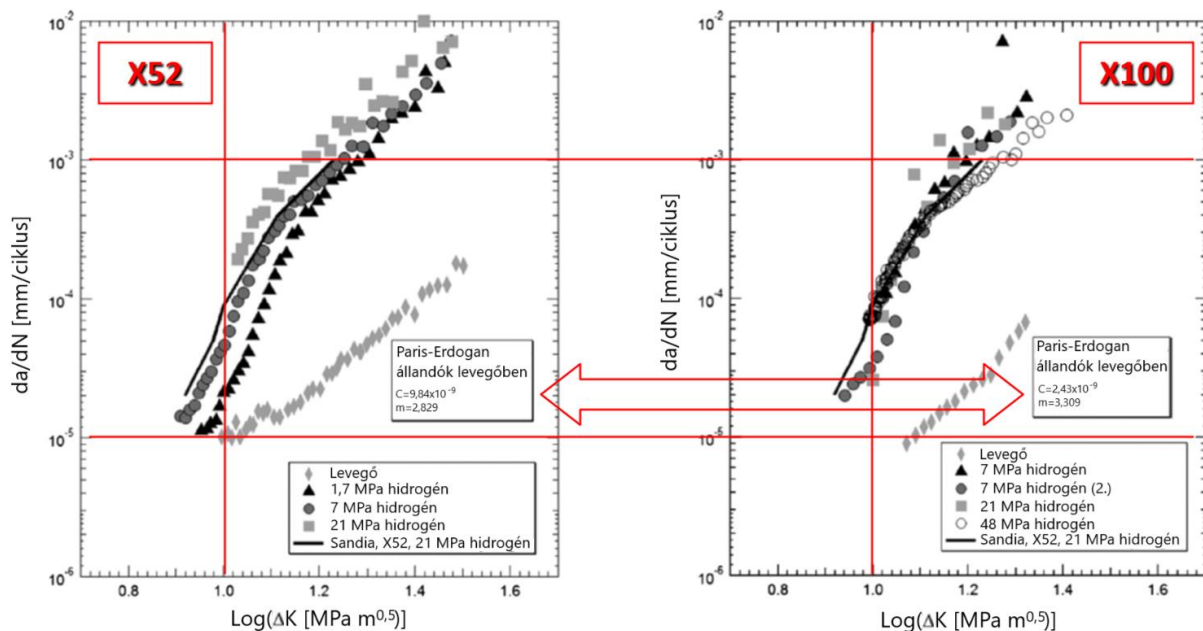
A 19. ábrán látható a kétlépcsős kapcsolat jelentősége a különböző API 5L csővezetékacélok fáradásos repedésterjedési viselkedésének leírására hidrogéntartalmú környezetben. A piros színű jelölők a hidrogén gázban, a fekete színűek pedig a levegőben vagy semleges környezetben mért adatokat jelölik. A zöld vonal a hidrogénben mért adatok felső határát jelöli, a kék vonal pedig a levegőben vagy más, az API 579-ben [47] szereplő, nem agresszív környezetben végzett vizsgálatok átlagos fáradásos repedésterjedési sebesség adatait szemlélteti.



19. ábra. Fáradásos repedésterjedési sebesség adatok különböző API 5L csővezetékacélokhöz [48].

Az ábrán jól megfigyelhetők a hidrogén gázban és a levegőben (vagy más, nem agresszív környezetben) kapott eredmények közötti különbségek.

Slifka és szerzőtársai. X52 és X100 acélokon, levegőben és hidrogén gázban, különböző nyomásokon, 1 Hz-en végeztek fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat, amelyek eredményei a 20. ábrán láthatók [23].

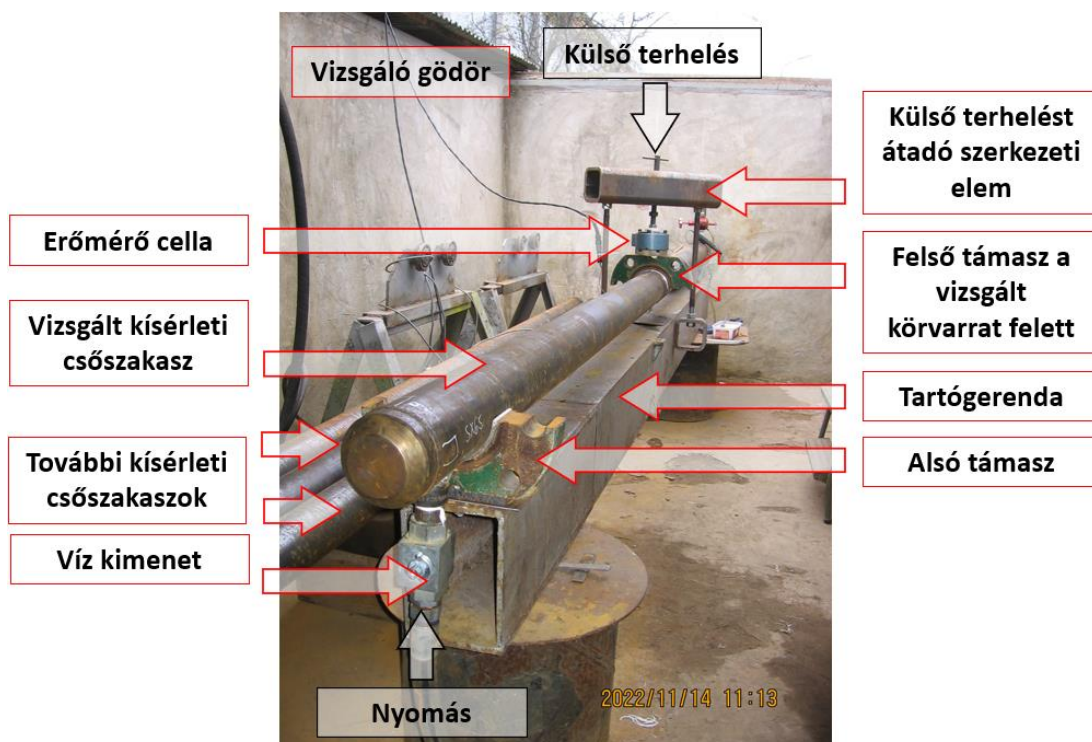


20. ábra. X52 és X100 acélok fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatai levegőben és hidrogénben, különböző nyomásokon [23].

A két csővezetékacél nagynyomású hidrogén gázban a különbségek ellenére közel azonos fáradási viselkedést mutat. A kapott eredmények alapján hidrogénben a fáradási repedésterjedési sebesség egy vagy két nagyságrenddel nagyobb, mint levegőben.

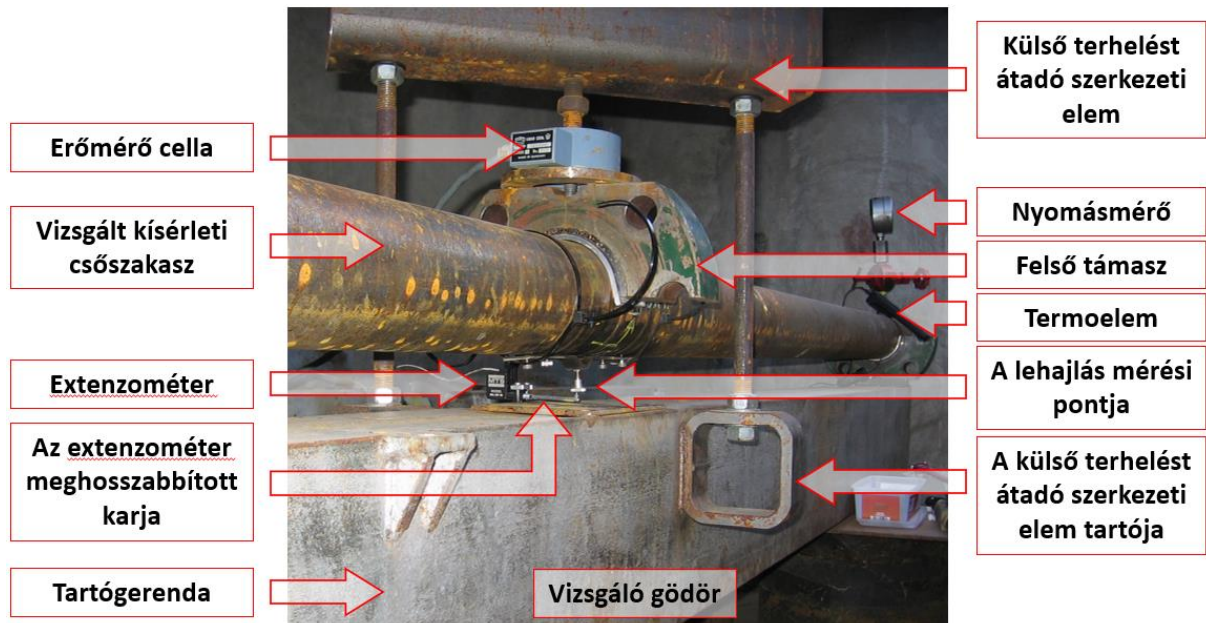
2.5. Teljes méretű csőszakasz vizsgálatok

A teljes méretű csővezetékcszakaszok vizsgálataival meghatározható a felszakadási (repszési) nyomás és a biztonsági tényező. A teljes méretű csővezetékcszakasz vizsgálatok különböző módokon végezhetőek el, az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben a 21. ábrán látható elrendezés került kialakításra.



21. ábra. Vizsgálórendszer komplex terhelési körülményekhez: a kifejlesztett rendszer.

A vizsgálórendszer és a vezérlő berendezések két különböző helyen vannak elhelyezve; a vezérlőberendezések a laboratóriumban, a vizsgálórendszer (a vizsgált csővezetékekkel) pedig az épületen kívüli vizsgáló gödörben. A vizsgálat során a ciklikus belső nyomás mellett külső (3 pontos) hajlítóterhelés is alkalmazható. Hegesztett kötéseknél a körvarrat mindig a csővezetékcszakasz közepén helyezkedik el. A külső terhelésből származó hajlítónyomaték egy kalibrált erőmérő cella segítségével állítható be, és a lehajlás mérése egy kalibrált, meghosszabbított karú extenzométerrel történik (22. ábra). A vizsgálatokat mesterséges bemetszésekkel (például a körvarratok hőhatás-övezetében, kerület irányban vagy a körvarratokra merőlegesen) is el lehet végezni.

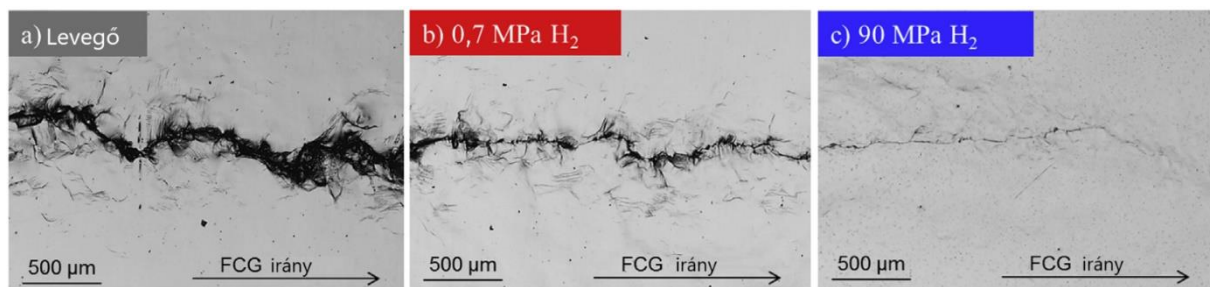


22. ábra. A lehajlás beállítása erőmérő cellával és annak ellenőrzése meghosszabbított karral ellátott extenzométerrel.

A fárasztó- és repesztővizsgálat elvégzése után a vizsgált anyag károsodott része tovább elemezhető. A kapott eredmények összehasonlítása érdekében a vizsgálatokat hidrogén hatás nélküli és korábban hidrogénnek kitett csöveken is el kell végezni.

2.6. Mikroszerkezeti elemzés

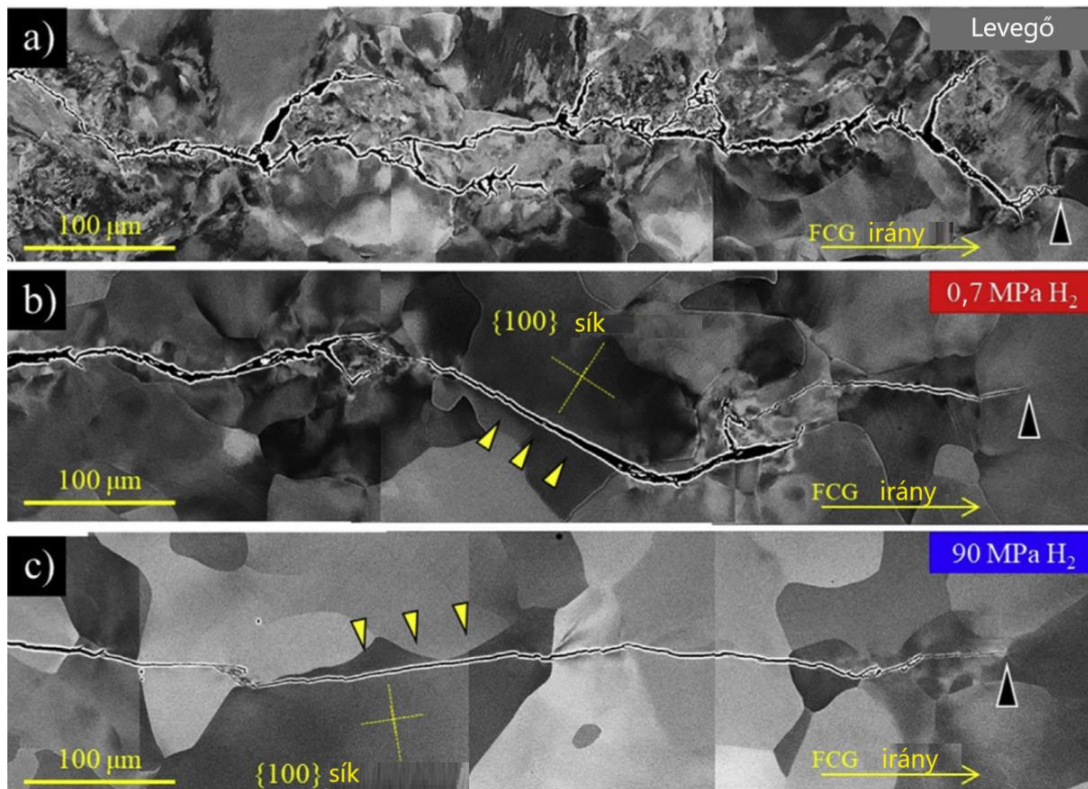
A mikroszerkezeti elemzés azért fontos, mert háttér-információkkal szolgálhat a vizsgált anyagok viselkedésének megértéséhez. Birenis és munkatársai a hidrogénnyomás hatását vizsgálták CT próbatestekkel. A 23. ábrán optikai mikroszkópos képek láthatók a repedéscsúcsot körülvevő területről levegőben és hidrogén gázban megrepedt próbatestekben, megközelítőleg $\Delta K=17 \text{ MPa}^{1/2}$ esetén [50].



23. ábra. Optikai mikroszkópos felvételek különböző hatásoknak kitett CT próbatestek oldalfelületeiről [50].

A képek jól szemléltetik a repedések terjedésének eltéréseit levegőben és különböző hidrogénnyomás mellett. Levegőben a repedés alapján képlékeny alakváltozás látható. 0,7 MPa hidrogén esetén

a képlékeny alakváltozás csak a repedés közelében látható; nagyobb hidrogénnyomáson pedig a repedés szinte elágazás nélkül terjed. Ugyanez a tendencia figyelhető meg a 24. ábrán látható képeken is. A képeken a fekete háromszög a repedéscsúcsok helyzetét, a sárga háromszög pedig a repedés pályáját mutatja a repedés síkja mentén [50].



24. ábra. Képek a repedési vonal környezetéből [50].

3. Összefoglalás

Az áttekintett és szisztematikusan feldolgozott közlemények alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- Mind gazdasági, mind környezetvédelmi szempontból szükséges a meglévő csővezetékek alkalmassá tétele a földgázzal kevert hidrogén vagy tiszta hidrogén szállítására.
- Megfelelően fel kell készülni a csővezetékek anyagainak és hegesztett kötéseinek hidrogén okozta elridegedésére, különös tekintettel a körvarratokra.
- A hidrogén hatására a csőanyagok alakváltozási képessége (nyúlás és kontrakció) csökken.
- A törési szívósság csökkenésének mértéke a folyáshatár növekedésével egyre nagyobb.
- A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a hidrogénnek jelentős hatása van a Wöhler görbére: csökken az élettartam és a kifaradási határ, és a két szakasz között eltűnik a töréspont.
- A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei alapján a különböző szilárdsági kategóriájú csővezetékacélok viselkedése hasonló a nagynyomású gáznemű hidrogénben.

- A teljes méretű csővezetékszakasz vizsgálat alkalmazásával a hidrogénnek kitett csövek károsodása összehasonlítható a hidrogén kitettség nélküli vizsgálati eredményekkel.
- A hidrogén hatásának jobb megértéséhez fontos a mikroszerkezeti elemzések elvégzése is. Különböző elemzési módszerek alkalmazásával jelentős különbségek figyelhetők meg többek között például a repedések terjedésében.
- Mivel a csővezetékek többsége hegesztett kötéseket tartalmaz, a hegesztés hatásának elemzése szintén fontos, mert a hidrogén a hegesztett kötések esetében a különböző tulajdonságok nagyobb mértékű csökkenését eredményezheti, mint az alapanyagok esetében.
- A különböző szilárdsági kategóriájú csővezetékek alapanyagainak és azok körvarratainak eltérő mértékű károsodása figyelhető meg hidrogén közegben:
 - = a változások és azok mértéke jellemzően a különböző anyagi mérőszámokban jelentkeznek,
 - = a változások és azok mértéke bizonyos anyagi mérőszámok esetében azonban nem mutatnak szignifikáns különbségeket.

Irodalom

- [1] *Hydrogen Piping and Pipelines*, ASME B31.12-2014, 2014.
- [2] M. Iannuzzi, "Environmentally assisted cracking (EAC) in oil and gas production," *Woodhead Publishing Limited*, vol. 15, pp. 570-607, 2011, doi: 10.1533/9780857093769.4.570.
- [3] V. Olden, A. Alvaro, and O. M. Akselsen, "Hydrogen diffusion and hydrogen influenced critical stress intensity in an API X70 pipeline steel welded joint: experiments and FE simulations," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 11474-11486, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.005.
- [4] R. L. Amaro, N. Rustagi, E. S. Drexler, and A. J. Slifka, "Sensitivity analysis of fatigue crack growth model for API steels in gaseous hydrogen," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 119, pp. 6-14, 2014, doi: 10.6028/jres.119.002.
- [5] R. L. Amaro, N. Rustagi, K. O. Findley, E. S. Drexler, and A. J. Slifka, "Modelling the fatigue crack growth of X100 pipeline steel in gaseous hydrogen," *Int. J. Fatigue*, vol. 59, pp. 262-271, 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.010.
- [6] International Energy Agency, "The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities," Report, 2019. Accessed: May 3, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [7] A. J. Slifka et al., "The effect of microstructure on the hydrogen-assisted fatigue of pipeline steels," in: *Proc. ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Div. Conf.*, PVP2013, Paris, France, 2013, doi: 10.1115/PVP2013-97217.
- [8] J. R. Fekete, J. W. Sowards, and R. L. Amaro, "Economic impact of applying high strength steels in hydrogen gas pipelines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 10547-10558, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.090.
- [9] G. Gabetta et al., "Test devices to assess SCC in ultra high pressure of H₂S," in: *NACE Corrosion 2013 Conference & Expo*, Orlando, FL, USA, 2013.
- [10] H. F. Lopez, R. Bharadwaj, J. L. Albarran, and L. Martinez, "The role of heat treating on the sour gas resistance of an X-80 steel for oil and gas transport," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 30A, pp. 2419-2428, 1999, doi: 10.1007/s11661-999-0250-2.
- [11] M. B. Djukic, V. S. Zeravcic, G. M. Bakic, A. Sedmak, and B. Rajcic, "Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 58, pp. 485-498, 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.05.017.

- [12] M. H. Meliani, Z. Azari, Y. G. Matvienko, and G. Pluvinae, "The effect of hydrogen on the master failure curve of APL 5L gas pipe steels," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 942-947, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.155.
- [13] J. Capelle, J. Gilgert, and G. Pluvinae, "A fatigue initiation parameter for gas pipe steel submitted to hydrogen absorption," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 833-843, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.10.063.
- [14] L. Cai, G. Bai, X. Gao, Y. Li, and Y. Hou, "Experimental investigation on the hydrogen embrittlement characteristics and mechanism of natural gas-hydrogen transportation pipeline steels," *Mater. Res. Express*, vol. 9, 2022, Art. no. 046512, doi: 10.1088/2053-1591/ac6654.
- [15] J. A. Ronevich, E. J. Song, Z. Feng, Y. Wang, C. D'Elia, and M. R. Hill, "Fatigue crack growth rates in high pressure hydrogen gas for multiple X100 pipeline welds accounting for crack location and residual stress," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 228, 2020, Art. no. 106846, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.106846.
- [16] G. Pluvinae, J. Capelle, and M. H. Meliani, "Pipe networks transporting hydrogen pure or blended with natural gas, design and maintenance," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 106, 2019, Art. no. 104164, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104164.
- [17] L. B. Godefroid, B. M. Sena, and V. B. T. Filho, "Evaluation of microstructure and mechanical properties of seamless steel pipes API 5L type obtained by different processes of heat treatments," *J. Mater. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 514-522, 2017, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0545.
- [18] G. Pluvinae, "Mechanical properties of a wide range of pipe steels under influence of pure hydrogen or hydrogen blended with natural gas," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 190, 2021, Art. no. 104293, doi: 10.1016/j.ijpvp.2020.104293.
- [19] S. W. Hong, J. M. Koo, C. S. Seok, J. W. Kim, J. H. Kim, and S. K. Hong, "Fatigue life prediction for an API 5L X42 natural gas pipeline," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 56, pp. 396-402, 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.12.016.
- [20] A. Duncan, P. S. Lam, and T. Adams, "Tensile testing of carbon steel in high pressure hydrogen," in: *Proc. ASME PVP Conf.*, San Antonio, Texas, USA, 2007, doi: 10.1115/PVP2007-26736.
- [21] J. Lukács and J. Kovács, "Influencing factors on structural integrity of pipeline girth welds under hydrogen containing environment," in: *76th IIW Annual Assembly and Int. Conf. on Welding and Joining*, Singapore, 2023.
- [22] T. Michler and J. Naumann, "Microstructural aspects upon hydrogen environment embrittlement of various bcc steels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 821-832, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.10.092.
- [23] J. A. Slifka, E. S. Drexler, N. E. Nanninga, Y. S. Levy, D. McColskey, R. L. Amaro, and A. E. Stevenson, "Fatigue crack growth of two pipeline steels in a pressurized hydrogen environment," *Corros. Sci.*, vol. 78, pp. 313-321, 2014, doi: 10.1016/j.corsci.2013.10.014.
- [24] N. E. Nanninga, Y. S. Levy, E. S. Drexler, R. T. Condon, A. E. Stevenson, and A. J. Slifka, "Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments," *Corros. Sci.*, vol. 59, pp. 1-9, 2012, doi: 10.1016/j.corsci.2012.01.028.
- [25] J. A. Ronevich, E. J. Song, B. P. Somerday, and C. W. S. Marchi, "Hydrogen-assisted fracture resistance of pipeline welds in gaseous hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 7601-7614, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.239.

- [26] X. B. Shi, W. Yan, W. Wang, L. Y. Zhao, Y. Shan, and K. Yang, "HIC and SSC behavior of high-strength pipeline steels," *Acta Metall. Sinica*, vol. 28, no. 7, pp. 799-808, 2015, doi: 10.1007/s40195-015-0257-1.
- [27] J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, and G. Pluvinaige, "The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 78, pp. 364-373, 2011, doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.10.007.
- [28] L. Gan, F. Huang, X. Zhao, J. Liu, and F. Cheng, "Hydrogen trapping and hydrogen induced cracking of welded X100 pipeline steel in H₂S environments," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 2293-2306, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.155.
- [29] Y. D. Han, R. Z. Wang, H. Wang, and L. Y. Xu, "Hydrogen embrittlement sensitivity of X100 pipeline steel under different pre-strain," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 22380-22393, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.054.
- [30] R. K. Z. Davani, E. Entezari, M. A. Mohtadi-Bonab, S. Yadav, J. F. A. Cabezas, and J. Szpunar, "Effect of electrochemical hydrogen charging on hydrogen embrittlement and mechanical properties of quenched tempered X100 pipeline steel," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 24, pp. 318-330, 2023, doi: 10.1007/s11668-023-01841-2.
- [31] Y. D. Han, R. Z. Wang, H. Y. Jing, L. Zhao, L. Y. Xu, and P. Xin, "Sulphide stress cracking behaviour of the coarse grained heat-affected zone in X100 pipeline steel under different heat inputs," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 20094-20105, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.092.
- [32] S. M. Beden, A. A. Battawi, and A. J. Shahrum, "Durability of the oil pipeline systems under environmental effects," *Iraqi J. Mech. Mater. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 564-576, 2018, doi: 10.32852/ijqfmme.v18i4.228.
- [33] K. Gong, M. Wu, and G. Liu, "Stress corrosion cracking behavior of rusted X100 steel under the combined action of Cl⁻ and HSO₃⁻ in a wet-dry cycle environment," *Corros. Sci.*, vol. 165, 2020, Art. no. 108382, doi: 10.1016/j.corsci.2019.108382.
- [34] E. Entezari, J. L. González-Velázquez, D. R. López, and M. A. B. Zuniga, "Review of current developments on high strength pipeline steels for HIC inducing service," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 61, pp. 20-45, 2022, doi: 10.3221/IGF-ESIS.61.02.
- [35] D. B. Rosado, W. D. Waele, D. Vanderschueren, and S. Hertelé, "Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels," *Sustainable Constr. Des.*, vol. 4, no. 1, 2013, doi: 10.21825/scad.v4i1.742.
- [36] M. Cabrini, E. Sinigaglia, C. Spinelli, M. Tarenzi, C. Testa, and F. M. Bolzoni, "Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J-integral curve," *J. Met.*, vol. 12, 2019, Art. no. 1843, doi: 10.3390/ma12111843.
- [37] D. Hardie, E. A. Charles, and A. H. Lopez, "Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels," *Corros. Sci.*, vol. 48, pp. 4378-4385, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2006.02.011.
- [38] Y. Sun and Y. F. Cheng, "Hydrogen-induced degradation of high-strength steel pipeline welds: A critical review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 133, 2022, Art. no. 105985, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105985.
- [39] J. C. Villalobos, A. Del-Pozo, B. Campillo, J. Mayen, and S. Serna, "Microalloyed Steels through History until 2018: Review of Chemical Composition Processing and Hydrogen Service," *J. Met.*, vol. 8, 2018, Art. no. 351, doi: 10.3390/met8050351.
- [40] J. Xie, L. Yang, B. Worthingham, and F. King, "Hydrogen effects on high strength pipeline steels," in: *NACE Corrosion Conference and Expo.*, 09120, 2009.

- [41] Y. Arai et al., "Development of X90-X100 seamless line pipes and their application," *Nippon Steel & Sumitomo Metal, Technical Report*, no. 107, 2015. Accessed: May 3, 2024. [Online]. Available: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/107-09.pdf>.
- [42] M. A. Islam and Z. N. Farhat, "Mechanical and electrochemical synergism of API X42 pipeline steel during erosion–corrosion," *J. Bio- Tribo-Corrosion*, vol. 1, 2015, Art. no. 26, doi: 10.1007/s40735-015-0027-7.
- [43] A. Contreras, M. Salazar, A. Albitar, R. Galván, and O. Vega, "Assessment of stress corrosion cracking on pipeline steels weldments used in the petroleum industry by slow strain rate tests," in *Arc Welding*, W. Sudnik, Ed., London: IntechOpen, 2011, pp. 127–150. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/25064>.
- [44] J. A. Ronevich, E. J. Song, B. P. Somerday, and C. W. San Marchi, "Hydrogen-assisted fracture resistance of pipeline welds in gaseous hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 10, pp. 7601-7614, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.239.
- [45] A. Alhussein, J. Capelle, J. Gilgert, S. Dominiak, and Z. Azari, "Influence of sandblasting and hydrogen on tensile and fatigue properties of pipeline API 5L X52 steel," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 2291-2301, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.081
- [46] C. San Marchi and B. P. Somerday, *Technical reference for hydrogen compatibility of materials*, SAND2012-7321, Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 2012. [Online]. Available: <https://www.sandia.gov/matlstechref/>.
- [47] M. Dadfarnia, P. Sofronis, J. Brouwer, and S. Sosa, "Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 21, pp. 10808-10822, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.216.
- [48] E. Torselletti, D. Scarsciafratte, A. Tenrenzi, and D. Tomassini, "Assessment of an existing gas pipeline to be retrofitted to hydrogen transport – material evaluations," in: *6th HAAE Conference*, Online, 28 Sep. 2021.
- [49] *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, BS 7910:2013+A1:2015, 2015.
- [50] D. Birenis, Y. Ogawa, H. Matsunaga, O. Takakuwa, J. Yamabe, Ø. Prytz, and A. Thøgersen, "Interpretation of hydrogen-assisted fatigue crack propagation in BCC iron based on dislocation structure evolution around the crack wake," *Acta Mater.*, vol. 156, pp. 245-253, 2018, doi: 10.1016/j.actamat.2018.06.041.

HIDROGÉNNEK KITETT CSŐTÁVVEZETÉK-SZAKASZOK ÉRTÉKELÉSE FULL-SCALE TESZTEK ALAPJÁN

Nagy Nóra

Tanársegéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: nora.nagy@uni-miskolc.hu

Lukács János

Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén csővezetékeken keresztül történő szállítása napjaink egyik legnagyobb gazdasági és biztonsági kihívása. A biztonságos üzemeltetés szempontjából elengedhetetlen mind a már meglévő vezetékek, mind az új vezetékek esetében a teljes méretű csővezeték szakaszokon elvégzett vizsgálatok, ún. full-scale tesztek elvégzése, amelyek vissztükrözik a valós üzemelési feltételeket. A cikkben P355NH anyagminőségű acél csővezeték szakaszokat és körvarrataikat vizsgáltuk tiszta hidrogénes környezetnek kitéve. Ezt követően full-scale tesztek végeztünk, majd a csővezeték szakaszok jellemző helyeiről mintákat vettünk a mechanikai tulajdonságok meghatározására. A kapott eredményeket összehasonlítottuk a csővezeték szakaszokon végzett korábbi, hidrogénes kitétség nélküli vizsgálatok eredményeivel.

Kulcsszavak: szállítóvezeték, hidrogén, full-scale teszt, elridegedési index

Abstract

Transporting hydrogen through pipelines is one of today's biggest economic and safety challenges. From the point of view of safe operation, full-scale tests that reflect real operating conditions are essential for both existing pipelines and new pipelines. In this paper, pipeline sections and their girth welds made of P355NH steel exposed to a pure hydrogen environment were examined. After that, full-scale tests were performed; furthermore samples from characteristic locations of the pipeline sections were cut to determine the characteristic mechanical properties. The results were compared with the results of previous pipeline sections without hydrogen exposure.

Keywords: transporting pipeline, hydrogen, full-scale-test, embrittlement index

1. Bevezetés

Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogén földgázba keverése potenciálisan csökkentheti a jelenleg földgázzal ellátott, nehezen dekarbonizálható ágazatok szén-dioxid intenzitását, a földgáz és az arra épülő ágazatok karbon-lábnyomát [1]. Bár a hidrogénnek a földgáz-infrastruktúrába való keverése számos előnnyel jár, számos kockázati tényező is van, amelyek a hidrogénnek a meglévő

földgázvezeték-infrastruktúrára (anyagok és berendezések) gyakorolt hatásait illetően kihívásokat jelentenek. Ezek a kockázati tényezők elsősorban a földgázszállító és -elosztó hálózatok különböző elemeinek hidrogénnel való kompatibilitására vonatkoznak.

A hidrogén-bekeveréssel kapcsolatos szerkezeti és biztonsági aggályok közé tartozik a csővezeték-rendszer anyagtulajdonságainak a romlása. A gáznemű hidrogén jelentős hatással van a csővezeték acélok fáradási viselkedésére és elridegedésére, nem beszélve a csővezetékek körvarratairól, amelyek még hidrogénes kitétség nélkül is alapvetően nagyobb kockázatú helyeknek számítanak. Továbbra is az egyik legfontosabb kérdésként merül fel, hogy miként vegyük figyelembe a szállítóvezetékek hidrogénnel való kompatibilitását az integritásuk értékelésekor. Kutatásunk során arra kerestük a választ, hogy az elvégzett vizsgálatok kellő megbízhatósággal fejezik-e ki, vagy – még sarkosabban megközelítve a kérdést – kifejezik-e egyáltalán, a hidrogénes környezet terhelése okozta többlet kockázatot.

A teljes méretű csővezeték szakaszokon végzett vizsgálatok (*full-scale tests*) költséges, de megbízható lehetőséget teremtenek a különböző szerkezeti elemek vagy szerkezetek integritásának a vizsgálatára, komplex terhelési feltételekkel [2], és gyakorlatilag minden esetben meghozzák a szükséges eredményeket:

- kezelhető kockázat és élettartam,
- biztonságosabb működés,
- kiszámítható maradó élettartam,
- megalapozottabban tervezhető ellenőrzések,
- optimálisnak tekinthető beavatkozások [3].

A teljes méretű csővezeték szakaszok tesztelésére különböző megoldásokat alkalmaznak. A vizsgálatok lehetőségeit természetesen befolyásolják a csővezetékek méretei, különösen a külső átmérő, mert ez meghatározza a vizsgált csőszakasz hosszát is. A tesztek elvégezhetőek külső terhelés és/vagy belső nyomás mellett, vagy kvázi-statisztikus és/vagy ciklikus terhelési feltételek mellett egyaránt. A hárompontos és négypontos hajlítóvizsgálatok (*TBB = Three Point Bending* és *FPB = Four Point Bending*) általánosan használt konfigurációk, mind kisebb átmérőknél [4], mind nagyobb átmérőknél [5], továbbá, mind kvázi-statisztikus terheléseknél, mind pedig ismétlődő terheléseknél, vagyis fárasztóvizsgálatoknál [6].

A nagynyomású hidrogén gáznak és/vagy hidrogénnel kevert földgáznak kitett szerkezetek, szerkezeti elemek különféle terhelési feltételek mellett működnek. Ami a hidrogén okozta elridegedés jelenségét illeti, a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatás két kategóriába sorolható: kvázistatisztikus és dinamikus. Az előbbi állandó vagy lassan változó terhelést jelez, ami lehetővé teszi a hidrogéneloszlás általános egyensúlyát és fontos a nagy gáznyomásnak kitett szerkezeti elemek esetében. Az utóbbi a dinamikus komponensekkel (például kompresszorokkal), statisztikus berendezések rezgéseivel vagy a gáznyomás ingadozásával kapcsolatos [7]. A hidrogén okozta elridegedési jelenség időbeli jellege miatt az anyagok érzékenységét gyakran kvázistatisztikus körülmények között vizsgálják és a szakítóvizsgálattal meghatározott tulajdonságokat számszerűsítik egy releváns hidrogénezett működési környezetre vonatkoztatva a szerkezetek/szerkezeti elemek teljesítményének és integritásának értékeléséhez [8].

2. Full-scale tesztek

A Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetében két vizsgáló rendszer működik nyomástartó edények és csővezetékek *full-scale* tesztjeihez. Mindkét rendszer számítógép által vezérelt elektro-hidraulikus rendszer. Ezekre a berendezésekre alapozva egyedi vizsgálórendszert fejlesztettek ki a csővezeték szakaszok komplex terhelésére, ciklikus belső nyomás alkalmazásával és külső többlet terheléssel [9]. A komplex terhelés utáni repesztővizsgálatok során a biztonsági tényező értékeit határozzuk meg, az alábbi egyenlet szerint:

$$\text{Biztonsági tényező} = \frac{\text{Karakterisztikus nyomás}}{\text{Legnagyobb megengedett üzemi nyomás}}, \quad (1)$$

ahol a mi esetünkben a karakterisztikus nyomás a repesztési (tönkremeneteli) nyomással egyezik meg.

2.1. Többlet terhelésnek kitett csőszakaszok

Az eredeti csővezeték-szakaszok P355NH minőségű, varratnélküli acélsőből készültek. A külső átmérőjük (OD) 114,3 mm (DN 100), a névleges falvastagságuk (t) pedig 5,6 mm, hosszúságuk 4,0 m volt. A vizsgált csővezeték szakaszok főbb jellemzőit a hidrogén expozíció nélkül az 1. táblázatban foglaltuk össze. Ahol volt hajlításból származó külső axiális feszültség, ott az kettő, négy, illetve hatszorosa volt a belső nyomásból származó axiális feszültségnek ($2 * \sigma_a$, $4 * \sigma_a$, illetve $6 * \sigma_a$) [9].

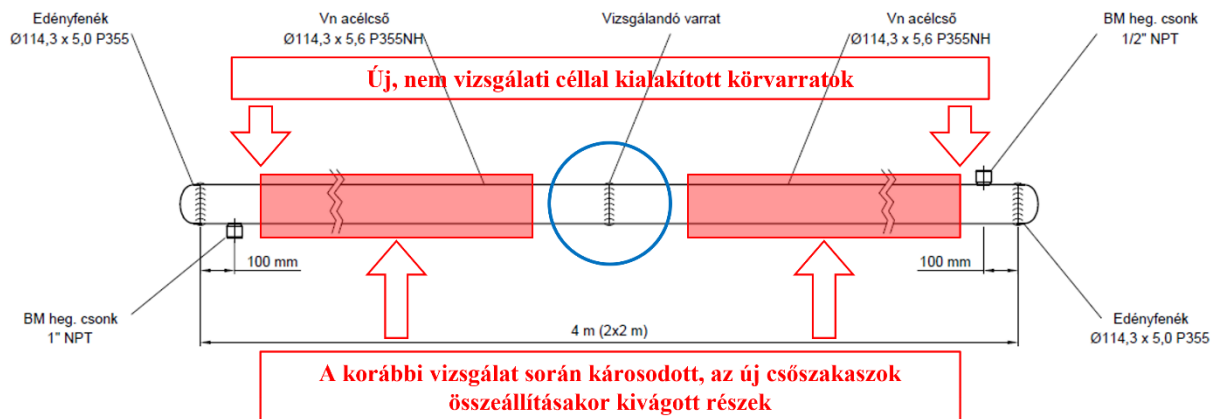
1. táblázat. Többlet terhelésnek kitett csőszakaszok

Jel	Belső nyomás fárasztáskor	Fárasztási ciklusszám	Külső terhelés	A bemetszés helye (névleges mélysége)	A bemetszés névleges hossza [mm]
Y1	(0,6-1) * MAOP	100 000	N/A	N/A	N/A
Y2	(0,6-1) * MAOP	100 000	N/A	N/A	N/A
Y4	(0,6-1) * MAOP	100 000	$2 * \sigma_a$	N/A	N/A
Y9	(0,6-1) * MAOP	100 000	$4 * \sigma_a$	körvarrat HHÖ ($0,67 * t$)	40
Y10	(0,6-1) * MAOP	100 000	$6 * \sigma_a$	körvarrat HHÖ ($0,50 * t$)	30

2.2. A hidrogénes kitétség hatása

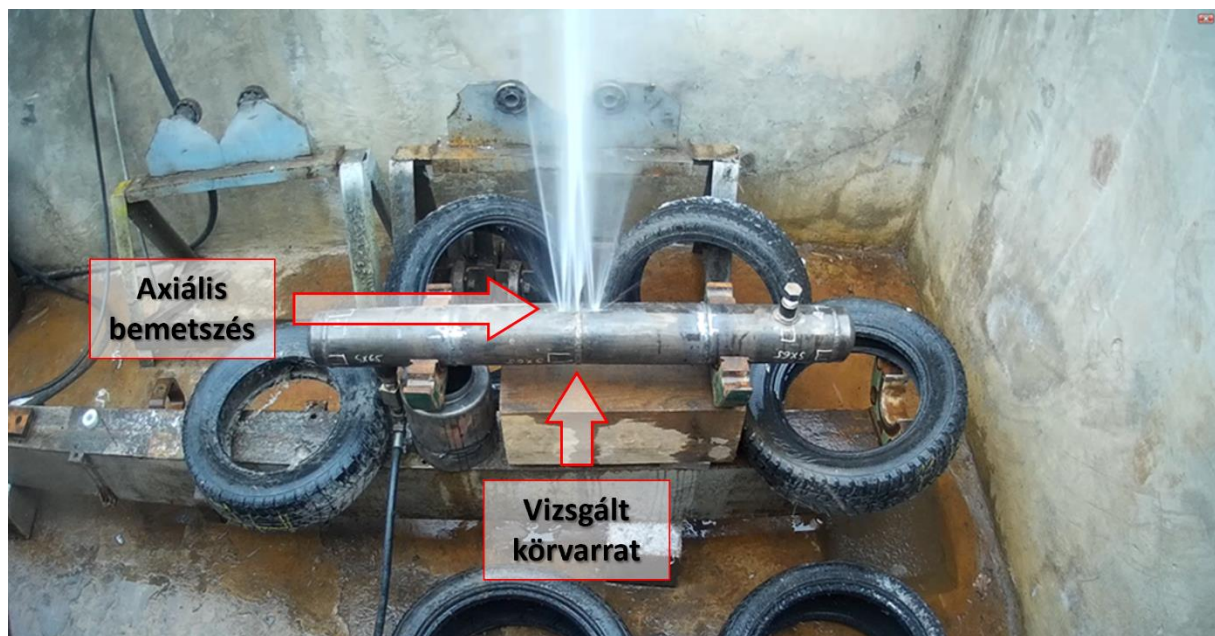
A hidrogénnek kitett csővezeték szakaszokat újraterveztük a 2.1. pontban bemutatott *full-scale* tesztek után. Az eredeti csővezeték szakaszokat és annak módosításait az 1. ábra mutatja be. Összesen öt vezeték szakaszt vizsgáltunk.

A csőszakaszok közül kettő 41 napig volt kitéve hidrogénnek, két másik csővezeték szakasz 92 napig, további egy szakasznak az expozíciós ideje pedig 183 nap volt. A hidrogénes kitétség a Linde Gáz Magyarország Zrt. budapesti telephelyén valósult meg 100% hidrogénes környezetben, a maximális megengedett üzemi nyomás kétszeresén ($2 * MAOP = 128 \text{ bar}$).

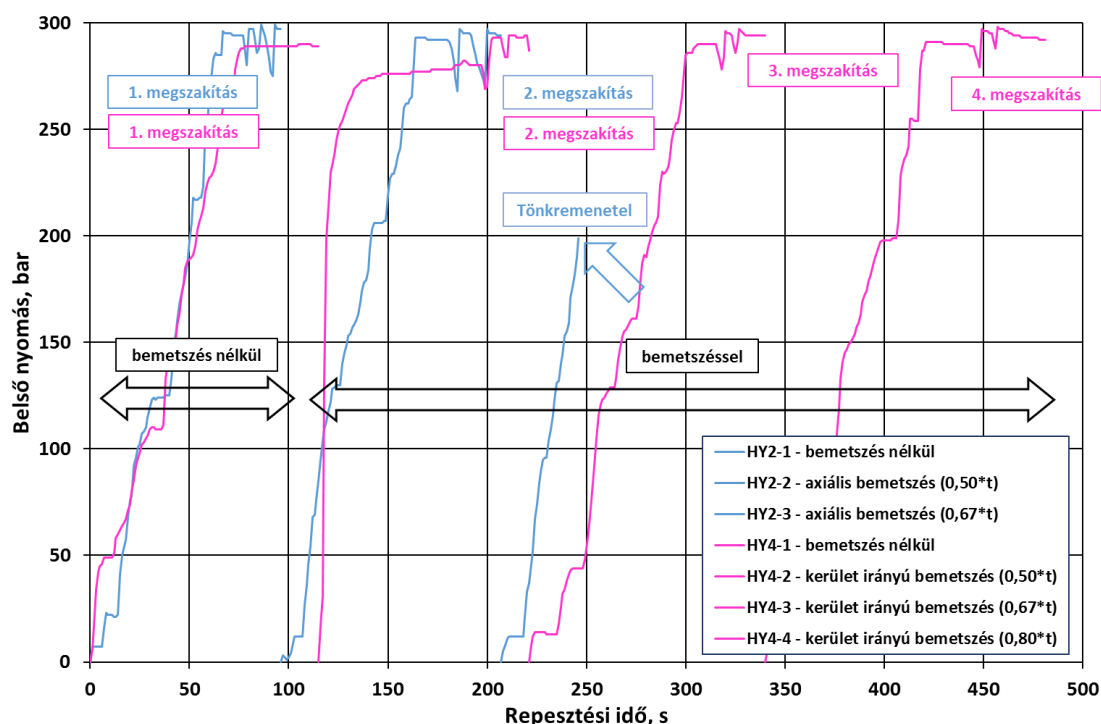


1. ábra. Az újratervezett vezeték szakaszok

A különböző expozíciós idők leteltével a hidrogénnek kitett csővezeték szakaszokon ismét repesztővizsgálatok végeztünk. (A jobb megkülönböztetés érdekében, a hidrogénes kitétséget egy H betű jelzi az eredeti csőszakaszok neve előtt.) Mivel a csőszakaszok nem károsodtak 300 bar névleges nyomás – a MAOP közel ötszörösének – az eléréséig, a teszt során egyre mélyebb mesterséges bemetszéseket hoztunk létre a repesztővizsgálat egyes felterhelési szakaszai között. A HY2 csőszakasz tönkremenetele (2. ábra) a harmadik felterhelési ciklusban következett be, a HY4 csőszakaszt a negyedik felterhelési ciklus után, a bemetszés mélyítésekor átvágták, így nem lehetett további felterhelést végrehajtani. A tesztek során rögzített belső nyomás-idő függvények a 3. ábrán láthatók, ahol a HY2 csőszakasz tönkremenetelét nyíl jelzi (HY2-3).



2 ábra. HY2 csővezeték szakasz tönkremenetelének pillanata.



3 ábra. Nyomás – idő függvények 41 nap hidrogén kitettség esetében.

A 41 napos kitettségű csőszakaszok vizsgálatának az eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat. 41 napos hidrogén kitettségű csőszakaszok vizsgálatai

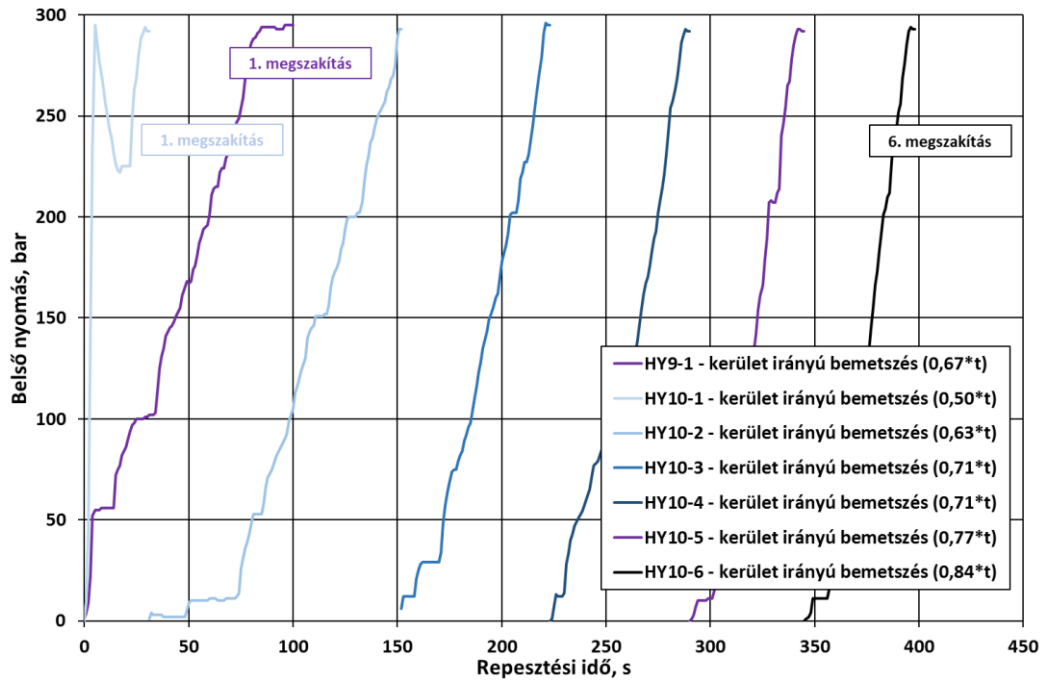
Jel	A bemetszés iránya	A bemetszés névleges mélysége	A bemetszés hossza [mm]	A tönkremenetel helye	Tönkremeneteli nyomás [bar]	Biztonsági tényező [-]
Y2	N/A	N/A	N/A	palást	447	6,98
HY2-1	N/A	N/A	N/A	nem következett be	> 299	> 4,67
HY2-2	axiális	0,50 * t	80	nem következett be	> 297	> 4,64
HY2-3	axiális	0,67 * t	80	körvarratra merőleges axiális bemetszés	199	3,11
Y4	N/A	N/A	N/A	palást	473	7,39
HY4-1	N/A	N/A	N/A	nem következett be	> 290	> 4,53
HY4-2	kerület irányú	0,50 * t	40	nem következett be	> 294	> 4,59
HY4-3	kerület irányú	0,67 * t	40	nem következett be	> 297	> 4,64
HY4-4	kerület irányú	0,80 * t	40	nem következett be	> 298	> 4,66

A repesztővizsgálatok során a bemetszés nélküli csővezeték szakaszok az üzemi nyomás közel ötszöröséig nem hibásodtak meg. A vizsgált körvarrat, amelyek a hőhatásövezetben kerület irányú, a névleges falvastagság 80%-áig terjedő, 40 mm hosszú, bemetszéseket tartalmaztak, szintén közel ötszörös üzemi nyomást viseltek el. A vizsgált körvarrat, amely axiális irányú, a névleges falvastagság 67%-ának megfelelő mélységű és 80 mm hosszú mesterséges bemetszést tartalmazott, a bemetszésben az üzemi nyomás háromszorosánál ment tönkre.

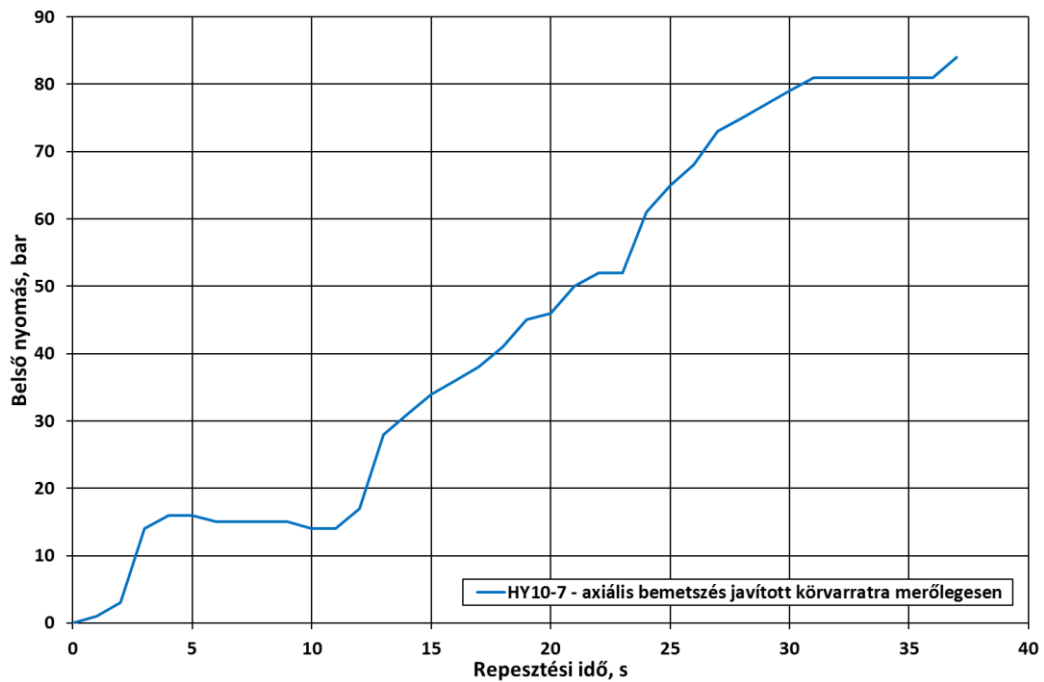
A 92 nap hidrogénes kitettség után vizsgált, HY9 és HY10 jelű csőszakaszokat a bemetszések mélyítésekor szintén átvágták, így előbbin az első, utóbbin pedig a hatodik felterhelés után már nem lehetett további terhelési ciklusokat végrehajtani. A valós körülmények modellezése és további információk gyűjtése céljából a HY10 jelű csőszakasz átvágott kerület irányú bemetszését hegesztéssel kijavítottuk és abba egy, a körvarratra merőleges, axiális bemetszést készítettünk. Mindezeket követően, az ilyen módon ismételt „üzemképes állapot”-ba helyezett csőszakaszon megismételtük a repesztővizsgálatot. Az eredményeket a 3. táblázatban foglaltunk össze, a 4. ábrán pedig a vizsgálatokhoz tartozó belső nyomás-idő függvények láthatók.

3. táblázat. 92 nap hidrogén kitettségű csőszakaszok vizsgálatai

Jel	A bemetszés iránya	A bemetszés névleges mélysége	A bemetszés hossza [mm]	A tönkremenetel helye	Tönkremeneteli nyomás [bar]	Biztonsági tényező [–]
Y9	kerület irányú	0,67 * t	40	palást	461	7,20
HY9-1	kerület irányú	0,67 * t	40	nem következett be	> 299	> 4,67
Y10	kerület irányú	0,50 * t	30	palást	467	7,30
HY10-1	kerület irányú	0,50 * t	30	nem következett be	> 295	> 4,61
HY10-2	kerület irányú	0,63 * t	60	nem következett be	> 293	> 4,58
HY10-3	kerület irányú	0,71 * t	60	nem következett be	> 296	> 4,63
HY10-4	kerület irányú	0,71 * t	70	nem következett be	> 293	> 4,58
HY10-5	kerület irányú	0,77 * t	70	nem következett be	> 293	> 4,58
HY10-6	kerület irányú	0,84 * t	70	nem következett be	> 293	> 4,58
HY10-7	axiális	0,67 * t	80	javított körvarratra merőleges axiális bemetszés	84	1,31



a)



b)

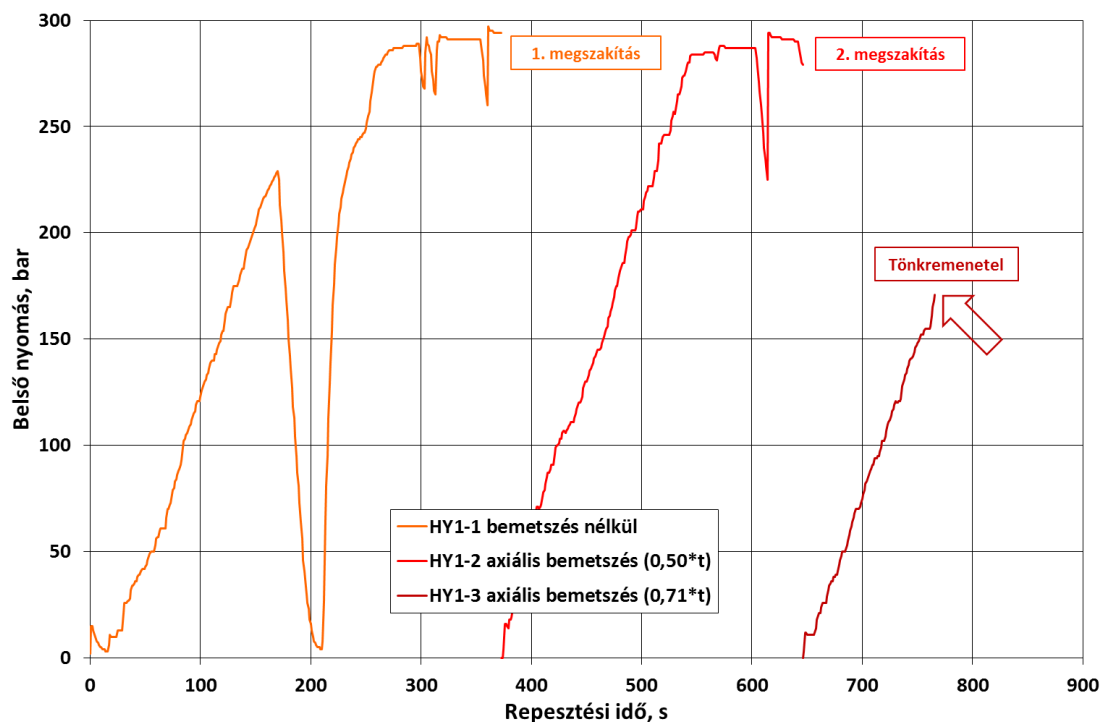
3. ábra. Nyomás – idő függvények: a) 92 nap hidrogén kitettség esetében, b) a HY10 jelű csőszakasz hegesztéses javítása után.

A vizsgált körvarratok, a hőhatásövezetükben lévő, eredeti, kerület irányú bemetszésekkel nem szenvedtek károsodást az üzemi nyomás közel ötszöröséig. A bemetszések méretét szisztematikusan növelve, mélység irányban a névleges falvastagság 84%-áig, kerület irányban pedig 70 mm-ig, a vizsgált körvarrat szintén nem szenvedett károsodást az üzemi nyomás közel ötszöröséig. A hegesztéssel javított, axiális irányú, a névleges falvastagság 67%-ának megfelelő mélységű és 80 mm hosszú mesterséges bemetszést tartalmazó körvarrat, a bemetszésben, az üzemi nyomást 30%-kal meghaladó nyomásnál ment tönkre.

A 183 nap hidrogénes kitettség után végzett vizsgálatok eredményeit a 4. táblázat foglalja össze, a HY1 csőszakasz belső nyomás-idő diagramja pedig a 4. ábrán látható.

4. táblázat. 183 napos hidrogén kitettségű csőszakasz vizsgálati

Jel	A bemetszés iránya	A bemetszés névleges mélysége	A bemetszés hossza [mm]	A tönkremenetel helye	Tönkremeneteli nyomás [bar]	Biztonsági tényező [-]
Y1	N/A	N/A	N/A	palást	449	6,98
HY1-1	N/A	N/A	N/A	nem következett be	> 299	> 4,67
HY1-2	axiális	0,50 * t	40	nem következett be	> 297	> 4,64
HY1-3	axiális	0,71 * t	60	körvarratra merőleges axiális bemetszés	171	2,67



4. ábra. Nyomás – idő függvények 183 nap hidrogén kitettség esetében.

A HY1 jelű, bemetszés nélküli csőszakasz az üzemi nyomás közel ötszöröséig nem hibásodott meg, a vizsgált körvarrat nem károsodott. Az axiális irányú, a névleges falvastagság 71%-ának megfelelő mélységű és 60 mm hosszú mesterséges bemetszésű körvarrat, a bemetszésben, az üzemi nyomás két és félszeresénél ment tönkre.

3. Hidrogén okozta elridegés az EI alapján

A hidrogén által kiváltott degradáció gyakran a képlékeny alakváltozási képesség csökkenésében nyilvánul meg, és kifejezhető a hidrogénezett környezetben és referencia környezetben végzett szakítóvizsgálatok után mért fajlagos keresztmetszet csökkenés (RA) változásával. Ez az úgynevezett elridegési index [10]:

$$\text{Elridegési index (EI)} = \frac{RA_{\text{referencia környezet}} - RA_{H_2}}{RA_{\text{referencia környezet}}} \quad (2)$$

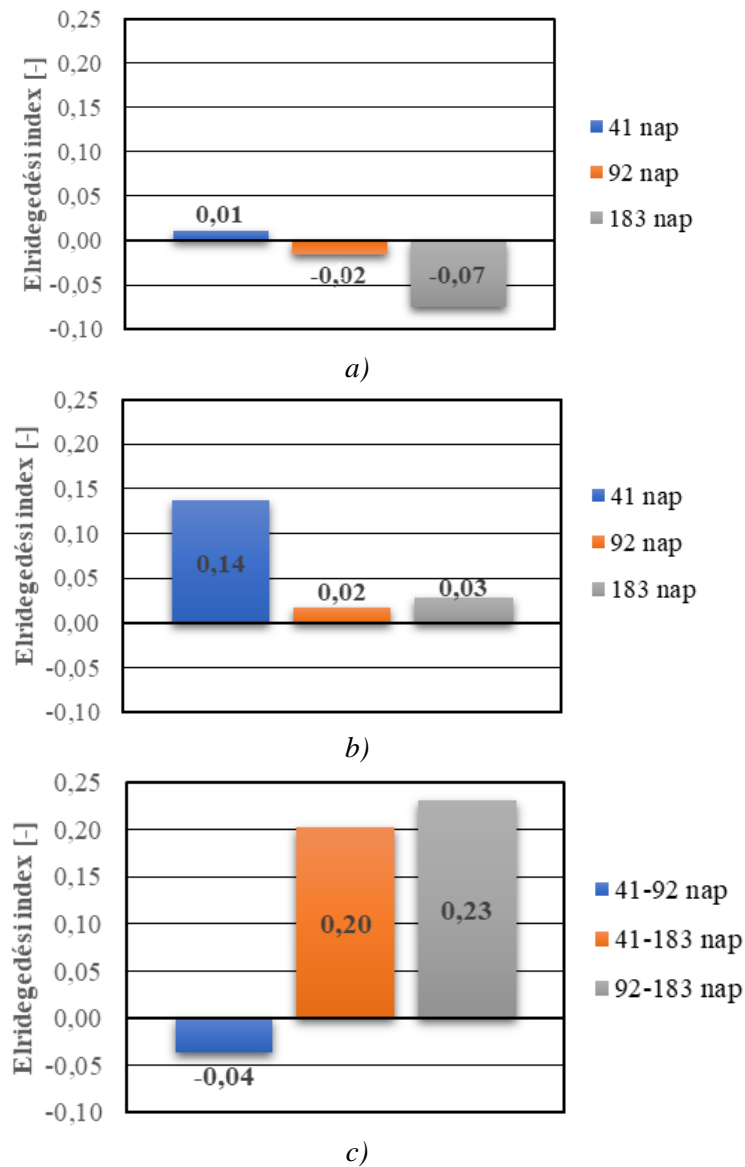
A (2) összefüggésből egyértelműen látható, hogy a magasabb elridegési index értékek a vizsgált anyag nagyobb hidrogén-érzékenységre utalnak. Az elridegési index kategóriáit az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat. Hidrogén-elridegési kategóriák az EI alapján

Elhanyagolható	0,00-0,03	Használható nyomás alatt lévő H környezetben
Alacsony	0,04-0,10	Használható H környezetben, ellenőrzött T és p mellett
Magas	0,11-0,30	Korlátozott H alkalmazásokhoz, törési és FCG elemzésekkel
Súlyos	0,31-0,50	H alkalmazásokhoz nem ajánlott
Rendkívüli	0,51-1,00	Nem használható H alkalmazásokhoz semmilyen T és p mellett sem

Az elridegési index meghatározása érdekében mind az alapanyagból, mind a körvarratokból próbatesteket munkáltunk ki. A *full-scale* tesztek során épen maradt vizsgálati körvarratok ipari körülmények között, kézi ívhegesztéssel, míg az új (a *full-scale* tesztekhez nem vizsgálati céllal készült) körvarratok (hibrid varratok) műhely körülmények között, AWI gyökkel és kézi ívhegesztésű töltő- és takaró varratokkal készültek. Ez utóbbi varratokat hidrogénes kitettséggel előtt nem vizsgáltuk, nem is vizsgálhattuk, ezért a referencia varrat a 41 nap kitettséggű körvarrat volt.

A szakítóvizsgálatokból meghatározott elridegési index értékeit mind az alapanyagra, mind a körvarratokra vonatkozóan az 5. ábra szemlélteti. A százalékos keresztmetszet-csökkenésből meghatározott elridegési index értékek az alapanyag esetében nem, de mind a *full-scale* tesztek során épen maradt, eredeti körvarratok, mind a hibrid technológiával készült körvarratok esetében a hidrogén-expozíció kedvezőtlen hatását jelzik.



5. ábra. Az elridegési index értékei különböző expozíciós időknél: a) alapanyag, b) eredeti körvarrat (vizsgálati varrat), c) új körvarrat (nem vizsgálati célú varrat).

4. Összefoglalás

A bemetszést tartalmazó csővezeték szakaszok hidrogénes kitétség utáni repesztővizsgálatai során a tönkremenetek az üzemi nyomásnál lényegesen nagyobb nyomásokon következtek be.

A hidrogén kitétség nélküli és a hidrogén hatásának kitétt csővezeték szakaszokra kapott biztonsági tényezők összhangban vannak, az értékek visszatükrözik a komplex mechanikai terhelés, a bemetszés-geometria és a hidrogén kitétség együttes hatását.

Az elridegedési index értékeiből megállapítható, hogy a körvarratok hidrogénes elridegedéssel szembeni ellenállás tekintetében az alapanyagoknál nagyobb kockázatú helynek tekinthetők. A kockázat mértéke tovább nő a különböző anyagminőségű és/vagy különböző technológiákkal készült körvarratok esetében.

5. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Linde Gáz Magyarország Zrt.-nek, személyesen Dr. Gyura László hegesztéstechnológiai vezetőnek, a vizsgált csőszakaszok hidrogén kitettségeinek lehetővé tételéért.

Irodalom

- [1] Melaina, M.W.; Antonia, O.; Penev, M., „Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues”; National Renewable Energy Lab: Golden, CO, USA, 2013.
- [2] K. J. Marsh, *Full-Scale fatigue testing of components and structures*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [3] Nagy N., Lukács J., „Behavior of transporting pipeline sections without and with hydrogen exposure based on full-scale tests,” *China Welding*, 2024, vol. 33, no. 3, pp. 14–24. doi: 10.12073/j.cw.20240524013.
- [4] Bastola, J. Wang, H. Shitamoto, A. Mirzaee-Sisan, M. Hamada, and N. Hisamune, “Full- and small-scale tests on strain capacity of X80 seamless pipes,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 1894–1903, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.238.
- [5] S. H. J. Van Es, A. M. Gresnigt, D. Vasilikis, and S. A. Karamanos, “Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes – Part I: Experiments,” *Thin-Walled Structures*, vol. 102, pp. 286–304, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.tws.2015.11.024.
- [6] Y. Hu, Y. Wang, P. Jia, J. Lv, and M. Wang, “Research on development and Test Analysis of Full-Scale Fatigue Test System of X65 Submarine Pipeline,” *E3S Web of Conferences*, vol. 253, p. 01055, Jan. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202125301055.
- [7] Laureys, R. Depraetere, M. Cauwels, T. Depover, S. Hertelé, and K. Verbeken, “Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 101, p. 104534, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jngse.2022.104534.
- [8] B. Hagen and A. Alvaro, “Hydrogen Influence on Mechanical Properties in Pipeline Steel - state of the art,” 2020. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2690051>
- [9] J. Lukács and A. Y. Dakhel, “Full-scale Fatigue and Burst Tests on Notched Pipeline Girth Welds, under Complex Loading Conditions,” *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 21, no. 5, pp. 53–70, Jan. 2024, doi: 10.12700/aph.21.5.2024.5.
- [10] A. Campari, F. Ustolin, A. Alvaro, and N. Paltrinieri, “A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 90, pp. 35316–35346, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.293.

A. Függelék

**A 2024-es esztendő legfontosabb intézeti és
Intézethez kötődő eseményei**

Időpont	Esemény
Január 18.	Gépészmérnöki MSc anyagtechnológiai és hegesztéstechnológiai specializáción, valamint Műszaki menedzser BSc technológiai blokkon végzett hallgatók záróvizsgálója az intézeti könyvtárban.
Január 18-19.	Dr. Lukács János egyetemi tanár részt vett a Budapesten megrendezett HYDROGEN OPEN 2024 – Hydrogen from Energy to Transport című rendezvényen.
Január 19.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató és Kovács Judit tudományos segédmunkatárs hegesztési gyakorlatot és műhely bemutatót tartott a miskolci Nyitott Ajtó Baptista Szakképző Iskola diákjainak.
Január 31-február 1.	Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Dr. Kovács Péter Zoltán, Dr. Lukács Zsolt, Dr. Meilinger Ákos és Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docensek részt vettek a Rheinmetall Hungary Zrt.-nél Zalaegerszezen megrendezett gyárlátogatáson, továbbá a Welding technology development trends and thermal impact testing, possible ways to automate welding című projekt kick-off meeting -jén és a projekt keretein belül megtartott képzésen .
Február 8.	Intézeti oktatói-kutatói értekezlet .
Február 8-9.	Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató részt vett és előadást tartott a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW – International Institute of Welding által) online formában megrendezett 1st Online Young Professionals International Conference – YPIC 2024 című rendezvényen.
Február 14.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató és Kovács Judit tudományos segédmunkatárs hegesztőműhely bemutatót , Dr. Kuzsella László egyetemi docens pedig Gleeble bemutatót tartott a Circletech projekt keretében a Lappeenranta-Lahti Műszaki Egyetemről (Lappeenranta-Lahti University of Technology, Finland) a Miskolci Egyetemre látogatóknak.
Március 1.	Dr. Lukács János egyetemi tanár és Nagy Nóra tanársegéd részt vett és Nagy Nóra előadást tartott a 3rd Hungary-Korea-Japan Joint Seminar on Design, Fabrication, and Maintenance of Welded Steel Structures, 2024 című, online formában megtartott rendezvényen.
Március 6-7.	Kovács Judit tudományos segédmunkatárs és Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató részt vett a High Innovative VET for Green and Digital Transformations (HINTS) projekt kick-off meeting -jén, Temesváron (Románia). (Részletesebb információk a projektről a B. Függelékben .)

Időpont	Esemény
Március 7.	A teljesítményértékelési rendszer (TÉR) 2023. évi eredményeinek ismertetése a Gépészmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatalában.
Április 3-4.	A Miskolci Szakképzési Centrum (MSZC) megbízásából Dr. Lukács János egyetemi tanár részt vett a Centre of Vocational Excellence in Welding and Non-Destructive Testing (COVE-WENDT) projekt kick-off meeting -jén, Temesváron (Románia). (Részletesebb információk a projektről a B. Függelékben .)
Április 11.	Kovács Judit PhD értekezésének műhelyvitája az intézeti könyvtárban. Az értekezés címe: <i>A hőbevitel hatása ultra-nagyszilárdságú acélok tulajdonságaira huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéskor</i> . (Témavezető: Dr. Lukács János egyetemi tanár, társ-témavezető: Dr. Gerald Wilhelm egyetemi tanár, Munich University of Applied Sciences.)
Április 17.	A Miskolci Egyetem nemzetközi tudományos láthatósága érdekében végzett kutatómunkájáért és kiemelkedő publikációs tevékenységéért A Miskolci Egyetem Kiemelkedő Kutatója a 2023. Évben elismerést vette át Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens és Dr. Lukács János egyetemi tanár.
Április 19.	A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hegesztési Szakosztályának szervezésében megrendezett X. Országos Hegesztési Versenyen a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának csapata 2. helyezést ért el. A nemzetközi hegesztőmérnöki képzés hallgatóiból álló csapat tagjai: Karsai Imre, Kis Dominik, Madarász Nándor, Szász Gábor.
Április 22-24.	A Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés (MhtE) által, az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. hegesztőmérnökei részére, Békésszentandráson szervezett szakmai továbbképzésen , felkért előadókként előadásokat tartott Dr. Lukács János egyetemi tanár és Dr. Molnár András c. egyetemi docens.
Április 24.	Egyetemi összoktatói-kutatói értekezlet .
Április 25.	Kovács Judit tudományos segédmunkatárs <i>Női hegesztők a gyakorlatban</i> címmel hegesztőműhely bemutatót tartott a Lányok Napján.
Május 6-10.	Dr. Gerald Wilhelm egyetemi tanár (Munich University of Applied Sciences) részt vett a Miskolci Egyetem által szervezett International Staff Week nevű rendezvényen.

Időpont	Esemény
Május 10.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató, Dr. Gáspár Marcel egyetemi docens, Kovács Judit tudományos segédmunkatárs és Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens részt vettek a Magyar Hegesztési Egyesület (MAHEG) MACH-TECH Nemzetközi gépgyártás-technológiai és hegesztéstechnikai szakkiállítás keretében, a Hungexpo Kongresszusi galériáján megrendezett közgyűlésén .
Május 16.	Intézeti oktatói-kutatói értekezlet .
Május 22.	Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Dr. Lukács János egyetemi tanár, Nagy Nóra tanársegéd részt vettek és előadásokat tartottak a Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2024 című konferencián. A konferencia Anyagtudomány, anyagvizsgálat című szekciójára az intézeti könyvtárban került sor. (Szekcióelnökök: Dr. Kiss Zoltán Péter, főiskolai tanár (Nyíregyházi Egyetem) és Dr. Lukács János egyetemi tanár.)
Május 30-31.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató, Lucas Alexandre de Carvalho PhD hallgató, Jemal Ebrahim Dessie PhD hallgató, Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Dr. Lukács János egyetemi tanár, Dr. Meilinger Ákos egyetemi docens, Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató, Abdulhakim Shukurea Rahmato PhD hallgató és Terdik Gábor (Verarbeiten Pausits Kft.) PhD hallgató részt vettek és előadásokat tartottak a MultiScience – XXXVII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference című rendezvényen. MultiScience – XXXVII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference Modern Materials Science and Engineering szekciójára az intézeti könyvtárban került sor. (Szekcióelnök: Dr. Lukács János egyetemi tanár, szekciótitkár: Kovács Judit tudományos segédmunkatárs.)
Május 31.	Nagy Nóra tanársegéd részt vett és előadást tartott Szegeden, a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karán megrendezett International Conference on Science, Technology, Engineering and Economy (ICOSTEE 2024) című konferencián.
Június 2-6.	A Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés (MHTE) meghívására, Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató részt vett a Innovative Quality VET Professional Teacher Training Program for Integration and Deployment of Staffs „Silent Knowledge” within Digitalization of Manufacturing ProcessesI (QVET) projekt Oktasd az oktatót tréningjén , Siófokon.

Időpont	Esemény
Június 5.	<p>Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad, Lucas Alexandre de Carvalho, Koroknai László (Dunaújvárosi Egyetem), Pap Ádám (KIS Kft.), Abdulhakim Shukurea Rahmato és Terdik Gábor (Verarbeiten Pausits Kft.) PhD hallgatók részt vettek és előadásokat tartottak a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola Doctoral Seminar rendezvényén.</p> <p>A Doctoral Seminar Materials Engineering and Mechanical Technology és Structural Integrity szekciói összevontan, az Intézet A/4. épületben lévő tantermében került sor. (Szekcióelnök: Dr. Lukács János egyetemi tanár, szekciótitkár: Kovács Judit tudományos segédmunkatárs.)</p>
Június 6-8.	<p>A Magyar Hegesztési Egyesület (MAHEG) szervezésében Dunaújvárosban, a Dunaújvárosi Egyetemen megrendezett XXXII. Nemzetközi Hegesztési Konferencián részt vett és előadásokat tartott Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató és Pap Ádám PhD hallgató (KIS Kft.).</p> <p>A XXXII. Nemzetközi Hegesztési Konferencián a Magyar Hegesztési Egyesület Rittinger János Díját vette át Kis Dominik volt gépészmérnök hallgatónk, mesterszakos diplomamunkájának elismeréseként. Diplomamunkájának címe: Ellenállás-ponthegeztés technológiai szimulálása végeelem módszer segítségével. (Témavezető: Dr. Meilinger Ákos egyetemi docens, konzulens: Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd).</p> <p>A XXXII. Nemzetközi Hegesztési Konferencián a Magyar Hegesztési Egyesület Zorkóczy Béla Érem elismerését vette át Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, kiemelkedő oktatási, kutatási, valamint hazai és nemzetközi közéleti tevékenysége elismeréséül.</p>
Június 10-14.	<p>Kovács Judit tudományos segédmunkatárs és Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató Erasmus tanulmányútja a University of Oulu-n (Oulu, Finnország).</p>
Június 17.	<p>Gépészmérnöki MSc anyagtechnológiai és hegesztéstechnológiai specializáción, valamint Műszaki menedzser BSc technológiai blokkon végzett hallgatók záróvizsgája az intézeti könyvtárban.</p>
Június 17-18.	<p>A 2023 februárjában indult, 28. hegesztő szakmérnöki (EWE/IWE) évfolyamon végzett hallgatók záróvizsgája az intézeti könyvtárban.</p>
Június 24.	<p>Dr. Tisza Miklós egyetemi tanár (1949-2021) mellszobrának avatása az Egyetem főépületének régi aulájában. A szobor Juha Richárd Munkácsy Mihály-díjas szobrászművész alkotása. (Részletesebb információk a rendezvényről a C. Függelékben.)</p>

Időpont	Esemény
Június 27.	Egyetemi diplomaátadó ünnepség. Az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet előterjesztésére Professor Honoris Causae Facultatis Artium Mechanicarum et Rerum Informaticarum Universitatis Miskolciensis címet vett át Dr. habil. Palotás Béla a Dunaújvárosi Egyetem professzor emeritusa.
Június 27.	Kovács Judit PhD értekezésének nyilvános vitája az intézeti könyvtárban és a Teams platformon. Az értekezés címe: <i>A hőbevitel hatása ultranagyszilárdságú acélok tulajdonságaira huzalelektródás védőgázos ívhegesztéskor.</i> (Témavezető: Dr. Lukács János egyetemi tanár, társtémavezető: Dr. Gerald Wilhelm egyetemi tanár, Munich University of Applied Sciences.) A bíráló bizottság 100%-os pontszámmal értékelte a kutató munkát, a minősítés „summa cum laude”.
Július 2.	Intézeti tanévzáró értekeztet a Miskolci Egyetemi Sportcentrumában.
Július 3.	Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens és Dr. Meilinger Ákos egyetemi docens részt vettek és előadást tartottak a FLUMEN II. projekt Gázátadó állomás stream-jének a Miskolci Egyetemen megrendezésre került workshop-ján .
Július 4.	A japán Nippon Steel vállalat képviselőinek látogatása az Intézetben. (Részletesebb információk a látogatásról a D. Függelékben .)
Július 4.	Lucas Alexandre de Carvalho részt vett és előadást tartott a Universidade Federal de São João del-Rei egyetem (UFSJ) online konferenciáján .
Július 6.	Lucas Alexandre de Carvalho részt vett és előadást tartott a Federal Institute of Minas Gerais (IFMG) intézet online fórumán .
Július 7-12.	Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Dr. Lukács János egyetemi tanár, Pap Ádám PhD hallgató (KIS Kft.) és Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens részt vett, dokumentumokat mutatott be és előadásokat tartott Rodoszon (Görögország), a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW – International Institute of Welding) 77. Éves Közgyűlésén és Nemzetközi Konferenciáján (77th Annual Assembly and International Conference).
Július 24-25.	Kovács Judit tudományos segédmunkatárs és Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató részt vett a High Innovative VET for Green and Digital Transformations (HINTS) projekt menedzsment ülésén , Madridban (Spanyolország). (Részletesebb információk a projektről a B. Függelékben .)
Szeptember 5.	Intézeti oktatói-kutatói értekeztet .

Időpont	Esemény
Szeptember 6.	<p>Kitüntetésátadó Ünnepi Szenátus Ülés.</p> <p>A Miskolci Egyetem Kiváló Tudományos Szerzője elismerést vette át Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens. A Miskolci Egyetem Kiváló Dolgozója kitüntetést vette át Szentpéteri László tanszéki mérnök. Az Intézet előterjesztése a következő volt: <i>„Szentpéteri László több évtizede dolgozik Intézetünk Komplex Anyagvizsgáló Laboratóriumában. Ez alatt az idő alatt folyamatosan képezve magát az anyagvizsgáló berendezéseink teljes vertikumán dolgozott. Alapos és precíz munkavégzése során számos ipari K+F kutatás és tudományos dolgozat létrejöttében vállalt érdemi szerepet.”</i></p>
Szeptember 9.	<p>Tanévnyitó Ünnepi Szenátusi Ülés.</p> <p>Doktori (Ph.D.) oklevelet vett át Kovács Judit tudományos segédmunkatárs.</p>
Szeptember 18.	Egyetemi Sportnap – kötelezően sporttal töltött munkanap.
Szeptember 19-20.	A Miskolci Szakképzési Centrum (MSZC) megbízásából Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens részt vett a Centre of Vocational Excellence in Welding and Non-Destructive Testing (COVE-WENDT) projekt menedzsment ülésén , Genovában (Olaszország). (Részletesebb információk a projektről a B. Függelékben .)
Szeptember 19-20.	Dr. Lukács János egyetemi tanár részt vett és felkért előadóként előadást tartott a Hegesztési Felelősök XXV. Országos Tanácskozásán , Visegrádon, amelyet a Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálói Egyesülés (MHTE) szervezett.
Szeptember 27.	Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd és Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs hegesztőműhely bemutatót és hegesztő szimulátoros gyakorlatot tartottak a Kutatók délelőttje során.
Október 1.	A Linde Gáz Magyarország Zrt. szervezésében Inárcson megrendezett Linde Hegesztési Szimpóziumon részt vett Sahm Alden Abd Al Anis Mohammad PhD hallgató, Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs és Dr. Lukács János egyetemi tanár, továbbá Dr. Lukács János felkért előadóként előadást tartott.
Október 3.	MultiLab Kalibráló és Kereskedelmi Kft. – az MTS Systems GmbH . hivatalos magyarországi képviselője – munkatársainak (Szabados Mihály ügyvezető, Jug Zoltán támogató mérnök) és az MTS európai képviselője munkatársának (Damir Bikbov, értékesítési menedzser) látogatása az Intézetben és az Intézet Komplex Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában.

Időpont	Esemény
Október 9-11.	Dr. Kuzsella László egyetemi docens részt vett és előadást tartott a XXXI. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás című rendezvényen.
Október 10.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató, Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd, Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Dr. Lukács János egyetemi tanár, Dr. Meilinger Ákos egyetemi docens, Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens, Dr. Török Imre c. egyetemi tanár részt vett, Dr. Gáspár Marcell, Dr. Lukács János és Dr. Meilinger Ákos előadást tartott a Centre of Vocational Excellence in Welding and Non-Destructive Testing (COVE-WENDT) projekt keretében, a Miskolci Szakképzési Centrumban (MSZC) megtartott Új trendek a hegesztésben elnevezésű workshop -on. (Részletesebb információk a projektről a B. Függelékben .)
Október 15-17.	Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens a Łukasiewicz Research Network – Upper Silesian Institute of Technology – Welding Centre által a Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés (MhtE) számára adott felkérésre, részt vett és előadást tartott a Katowicében (Lengyelország) megrendezett 65th International Welding Conference című rendezvényen.
Október 17-18.	75 éves a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kara – Kari Jubileumi Eseménysorozat. (A jubileumi rendezvényekért felelős eseti bizottság tagja Dr. Kuzsella László egyetemi docens.)
Október 18.	Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Szekció a 75 éves a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kara – Kari Jubileumi Eseménysorozat keretében. (Szekcióelnök: Dr. Lukács János egyetemi tanár, szekciótitkár: Nagy Nóra tanársegéd.) (Részletesebb információk a szekcióról az E. Függelékben .)
Október 21.	Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd, Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Dr. Kovács Péter Zoltán egyetemi docens és Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens a 2024/2025. tanév őszi félévében mentorként részt vettek az egyetemi Mentor Programban .
November 7.	Az oktatói munka hallgatói véleményezése (OMHV) 2023/2024. tanév 2. félévi eredményeinek ismertetése, értékelése, a szükséges változtatások egyeztetése.

Időpont	Esemény
November 7-8.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató, Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs és Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató részt vett a High Innovative VET for Green and Digital Transformations (HINTS) projekt menedzsment ülésén , Temesváron (Románia). (Részletesebb információk a projektről a B. Függelékben .)
November 7-8.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató, Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs, Pap Ádám (KIS Kft.) PhD hallgató, Abdulhakim Shukurea Rahmato PhD hallgató és Terdik Gábor (Verarbeiten Pausits Kft.) PhD hallgató részt vett és előadást tartott a Román Hegesztési és Anyagvizsgálati Intézet (Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale) által szervezett Innovative Technologies for Joining Advanced Materials – TIMA 2024 elnevezésű konferencián.
November 7.	Ahmad Yasser Dakhel PhD hallgató, Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd, Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens, Koroknai László (Dunaújvárosi Egyetem) PhD hallgató és Nagy Nóra tanársegéd részt vett és előadást tartott a Magyar Tudomány Ünnepe rendezvénysorozat Young people for science című rendezvényén. A MTA Miskolci Területi Bizottság (MAB) Gépészeti és Informatikai Szakbizottsága Anyag- és Gyártástechnológiai Munkabizottságának (AgyM) szervezésében megtartott rendezvényre a Gyártástudományi Intézet C/1. épületben lévő tantermében került sor. (Szekcióelnökök: Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens és Dr. Varga Gyula egyetemi docens.)
November 13.	Dr. Gáspár Marcell egyetemi docens részt vett és előadást tartott a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karának Bányászati és Energia Intézete által, a Miskolci Egyetemen megrendezett Szakmai Hidrogén Workshop-on .
November 17-19.	Sas Illés (Elektro - MontőRING Kft.) PhD hallgató online formában részt vett és előadást tartott a Belgrádban (Szerbia) megrendezett 12th Annual Conference of Society for Structural Integrity and Life (DIVK12) konferencián.
November 18.	Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad PhD hallgató és Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs hegesztési gyakorlatot és műhely bemutatót tartott a Miskolci Kolping Katolikus Technikus, Szakképző Iskola és Szakgimnázium diákjainak.
November 19.	A Miskolci Egyetem rektorának és gazdasági vezetőjének online tájékoztatója a Miskolci Egyetem zártkörű YouTube csatornáján, <i>Eredmények: 2024, tervek: 2025</i> címmel.

Időpont	Esemény
November 22.	<p>Koroknai László (Dunaújvárosi Egyetem), Pap Ádám (KIS Kft.) Abdulhakim Shukurea Rahmato és Sas Illés (Elektro - Montőring Kft.) PhD hallgatók részt vettek és előadásokat tartottak a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola Doctoral Forum rendezvényén.</p> <p>A Doctoral Forum Materials Engineering and Mechanical Technology, Manufacturing Systems and Processes, Assembly Systems és Structural Integrity szekciói összevontan, a Gyártástudományi Intézet C/1. épületben lévő tantermében került sor. (Szekcióelnökök: Dr. Lukács János egyetemi tanár és Dr. Maros Zsolt egyetemi docens, szekciótitkár: Nagy Antal mérnök-tanár.)</p>
December 4.	<p>Nagy Nóra tanársegéd, Dr. Lukács János egyetemi tanár és Dr. Török Imre c. egyetemi tanár részt vettek a FLUMEN II. projekt Vezetékdinamika stream-jének a Miskolci Egyetemen megrendezésre került workshop-ján, amelyen Dr. Lukács János összefoglaló előadást tartott az Intézet által a projektben végzett szakmai munkáról.</p>
December 5-6.	<p>Fodorné Cserépi Mariann tanársegéd és Dr. Kovács Judit tudományos segédmunkatárs hegesztőműhely bemutatót tartottak az Egyetemi Nyílt Napon.</p>
December 19.	<p>Intézeti évváró értekezlet az intézeti könyvtárban és az A/4. épületben lévő intézeti tantermekben.</p>

B. Függelék

A COVE-WENDT és a HINTS projektek

A COVE-WENDT ERASMUS PROJEKT

A projekt keretében létrehozandó **Hegesztési és Roncsolásmentes Anyagvizsgálati Szakmai Kiválósági Központ** (*Centre of Vocational Excellence in Welding and Non-Destructive Testing, CoVE-WENDT*) célja, hogy összefogja a meglévő szakképzési központok, kutatóintézetek és egyetemek oktatóit, valamint a hegesztési szektor ipari vállalatainak képviselőit az innovációt segítő nemzetközi szintű CoVE hálózat kialakítására.

A pályázat célkitűzései (*Specific Objectives*)

O1: Együttműködési partnerség kiterjesztése az innovációs rendszer szereplői között a hegesztési szektorban az innováció, valamint a kapcsolódó technológiák és a regionális fejlődés érdekében. Bevált gyakorlatok és új ismeretek terjesztése a szakképzés kiválóságának előmozdítása érdekében.

O2: Nemzetközi együttműködési hálózatként használt IT-platform fejlesztése a különböző országokból származó CoVE-k számára a jó gyakorlatok (*best practices*) megosztása és az új ismeretek terjesztése érdekében.

O3: Innovatív tananyagok kidolgozása és megfelelő képzési programok biztosítása a hegesztési ágazat zöld és digitális átmenetéhez.

O4: A szakoktatók kulcskompetenciáinak fejlesztése az innovatív megközelítések alkalmazására és a társadalmi kihívások leküzdésére, valamint az innováció előmozdítására az oktatásban a meglévő CoVE-k minőségének és hatékonyságának növelése érdekében.

A **4 éves futamidejű**, közvetlen brüsszeli beadású pályázat **nemzetközi konzorcium** keretében az Erasmus program támogatásával valósul meg, amelynek vezetését a Román Hegesztési és Anyagvizsgálati Intézet (ISIM) látja el. Az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet kollégái szakértőkként vesznek részt a projekt megvalósításában a Miskolci Szakképzési Centrum, mint konzorciumi tag megbízásából. A pályázat támogató partnerei Magyarország részéről a Miskolci Egyetem, a Borsod-Abaúj-Zemplén Vármegyei Kereskedelmi és Iparkamara (BOKIK), a BORA 94 Borsod-Abaúj-Zemplén Vármegyei Fejlesztési Ügynökség Nonprofit Kft., és a Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés (MHTE).

A projekt az Európai Unió finanszírozásával valósul meg. Az itt szereplő vélemények és állítások a szerző(k) álláspontját tükrözik, és nem feltétlenül egyeznek meg az Európai Unió vagy az Európai Oktatási és Kulturális Végrehajtó Ügynökség (EACEA) hivatalos álláspontjával. Sem az Európai Unió, sem az EACEA nem vonható felelősségre miattuk.

Centre of Vocational Excellence in Welding and Non-Destructive Testing
101143944 — COVE-WENDT — ERASMUS-EDU-2023-PEX-COVE



Az Európai Unió
társfinanszírozásával





A **COVE-WENDT** célja, hogy egyesítse a meglévő szakképzési központok, kutatóintézetek és egyetemek tanárainak és oktatóinak, a hegesztés területéhez kapcsolódó ipari vállalatoknak és a Quadruple Helix egyéb érdekelt feleinek készségeit, létrehozva a szakképzési kiválósági központok nemzetközi hálózatát az európai készségfejlesztés támogatására.

FŐ CÉLOK

- EGYÜTTMŰKÖDÉS ÉS INNOVÁCIÓ**
A hegesztés területén az együttműködések megerősítése a Quadruple Helix modell segítségével a helyi és regionális innováció elősegítése érdekében.
- NEMZETKÖZI IT-PLATFORM**
A szakképzési kiválósági központok (CoVE-k) együttműködési hálózatának létrehozása a jó gyakorlatok megosztása és a szakképzési kiválóság támogatása érdekében.
- OKTATÁSI ANYAGOK ÉS KÉPZÉS**
Korszerű tananyagok és képzési programok kidolgozása a zöld és digitális átálláshoz a hegesztés területén.
- SZAKKÉPZÉSI OKTATÓK KOMPETENCIÁI**
A szakképzési oktatók legfontosabb kompetenciáinak fejlesztése az innováció előmozdítása és a társadalmi kihívások kezelése érdekében.

Irányelvekkel kapcsolatos anyagok

2 tanterv a társadalmi kihívásokkal foglalkozó, tanulóközpontú tanfolyamokhoz.

IT Platform

Transznacionális platform a jó gyakorlatok megosztására, webináriumok, megbeszélések és tanfolyamok szervezésére.

Állásbörze

Képzett szakemberek és munkalehetőségek összekapcsolása.

Élő laboratóriumi hálózat

Innovatív ötletek, termékek és technológiák tesztelése.

Rendezvények és képzések

24 digitális és zöld képzési rendezvény, 12 állásbörze, 2 oktatóképzés, 2 nemzetközi campus, 2 nemzetközi készségverseny, 16 disszeminációs rendezvény.

Infrastruktúrafejlesztés

A 4 szakképzési kiválósági központ infrastruktúrájának fejlesztése.

AMIT A COVE-WENDT BIZTOSÍT



CÉLCSOPORTOK

A digitális oktatásra és a zöld iparra való átállás iránti kereslet növekedésével a képzési központoknak fejlődniük kell, hogy lépést tudjanak tartani. Hiány van azonban az e-learning-ben jártas oktatókból, és sokan még nincsenek felkészülve erre az új megközelítésre.

A COVE-WENDT projekt ezt a problémát célzottan kezeli:

<p>SZAKÉRTŐK A HEGESZTÉS ÉS A ROKON ELJÁRÁSOK TERÜLETÉN</p> <p>Oktatók és tanárok a felsőoktatásból és a K+F intézetekből.</p>	<p>KARRIERFEJLESZTŐK</p> <p>Mérnökök és más szakemberek, akik a hegesztés vagy a roncsolásmentes vizsgálat területén szeretnének karriert építeni.</p>	<p>KARRIER VÁLTOZÁSOK</p> <p>Fiatal diplomások és olyan személyek, akik hegesztőként vagy roncsolásmentes vizsgálati személyzetként akarnak továbbtanulni.</p>
<p>KIS- ÉS KÖZÉPVÁLLALKOZÁSOK A HEGESZTÉS TERÜLETÉN</p> <p>Lehetőséget biztosít a vállalatok számára, hogy képezzék az alkalmazottjaikat.</p>	<p>JÓVÁHAGYOTT KÉPZŐHELYEK</p> <p>Szaktudásuk és tanúsított képzési kínálatuk bővítése.</p>	

HATÁS

A COVE-WENDT projekt forradalmasítja a hegesztési és rokon eljárásokat az alábbiak révén:

<p>INNOVATÍV ESZKÖZÖK ÉS KERETRENDSZEREK</p>	<p>KÉSZSÉGFEJLESZTÉS</p>	<p>TRANSZNACIONÁLIS IT PLATFORM</p>	<p>DINAMIKUS RÉGIONÁLIS KÉSZSÉGFEJLESZTŐ RENDSZEREK</p>
---	---------------------------------	--	--

PARTNEREK



Az Európai Unió társfinanszírozásával

Az Európai Unió finanszírozásával. A kifejtett nézetek és vélemények azonban kizárólag a szerző(k) álláspontját tükrözik, és nem feltétlenül egyeznek meg az Európai Unió vagy az Európai Oktatási és Kulturális Végrehajtó Ügynökség (EACEA) hivatalos álláspontjával. Sem az Európai Unió, sem az EACEA nem vonható felelősségre miattuk.

A HINTS PROJEKT

A HINTS (*High Innovative VET for green and digital Transformations*) projekt 2024. február 1-én indult, 24 hónapos időtartammal.

A **projekt célja**, hogy támogassa a nyugat-balkáni (*Western Balkans = WB*) és a dél-mediterrán (*Southern Mediterranean = SM*) országokat, hogy javítsák a szakképzés minőségét és reagáló képességét a jelenlegi társadalmi fejlesztési stratégiákhoz való igazodás, valamint a zöld és digitális gazdaságra való átállás érdekében.

A projekt a készségfejlesztési rendszer támogatásával járul hozzá a Gazdasági és Beruházási Terv végrehajtásához a Programhoz nem társult harmadik országokban, a következő **konkrét célkitűzésekkel**.

- 1) Együttműködési hálózat létrehozása az EU intézményei és a WB és SM országok szakképzési szolgáltatói között a zöld- és digitális átmenet együttes megvalósulása érdekében.
- 2) A WB és SM országokból származó 5 szakképzési szolgáltató munkatársainak és tanárainak kapacitásbővítése a jógyakorlatok megosztásával, kommunikációval és megfelelő képzési programok biztosításával.
- 3) Öt WB és SM országokban működő szakképzési szolgáltató fejlesztése a megfelelő minőségbiztosítási rendszer megvalósításának támogatásával.
- 4) Öt WB és SM országokban működő szakképzési szolgáltatónál az oktatási innováció előmozdítása innovatív e-learning megközelítés bevezetésével a társadalmi kihívásoknak való megfelelés érdekében, amely során az alábbiak valósulnak meg:
 - szakpolitikai anyagok (2 tanterv és útmutató) és 2 innovatív oktatási anyag biztosítása a zöld és digitális gazdaság felé történő átmenet témakörében;
 - 1 transznacionális informatikai platform kifejlesztése és felhasználása a jó gyakorlatok (*best practices*) megosztására és terjesztésére minimum 1000 javaslattal;
 - 5 releváns képzési program a WB és SM országok szakképzési szolgáltatóinak munkatársai és tanárai számára minimum 50 résztvevővel;
 - 5 WB és SM országból származó szakképzési szolgáltató támogatása a megfelelő minőségbiztosítási rendszer kialakításához;
 - a WB és SM országokból 5 szakképzési szolgáltató támogatása egy innovatív e-learning rendszer megvalósításához;
 - 5 disszeminációs esemény zöld és digitális témákban, WB és SM országokban szervezve, minimum 250 résztvevővel;
 - 4 EU-országban szervezett disszeminációs esemény a projekt eredményeinek bemutatására minimum 200 résztvevővel.

A projekt célcsoportját az ipari szakemberek képezik.

A projektet támogató programok az Erasmus+ és a Kormányzati Önerő Alap.

A projekt **koordinátora** a Román Hegesztési és Anyagvizsgáló Intézet (*Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara*).

A **konzorcium tagjai** a következő intézmények:

- Európai Hegesztési Szövetség (*European Federation for Welding, Joining and Cutting = EWF*)
- Spanyol Hegesztési és Technológiai Szövetség (*Centro Español de Soldadura y Tecnologías de Unión = CESOL*)
- Helixconnect Europe, Románia
- Montenegrói Egyetem (*University of Montenegro*)
- AMTA Akadémia, Tunézia (*AMTA Academy, Tunisie*)
- Alexandriai Egyetem, Egyiptom (*Alexandria University, Egypt*)
- Tiranai Műszaki Egyetem, Albánia (*Polytechnic University of Tirana, Albania*)
- Jordániai Mérnökök Szövetsége (*Jordan Engineers Association*)
- Miskolci Egyetem

<https://www.hintsproject.eu/>



**Az Európai Unió
társfinanszírozásával**



**AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROJEKT**

C. Függelék

**Prof. Dr. Tisza Miklós mellszobrának avatása
a Miskolci Egyetem főépületének régi aulájában**



SZOBORAVATÓ EMLÉKBESZÉD

**Dr. Lukács Zsolt, egyetemi docens,
az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet igazgatója**

Tisztelt Rektorhelyettes Úr, tisztelt Dékán Úr, tisztelt Professor Asszonyok és Urak, tisztelt Család, kedves Vendégeink, kedves Kollégák!

A mai napon nekem jutott az a megtisztelő feladat, hogy pár gondolatot megosszak önökkel Tisza professzor úr tanszék- és intézetvezetői munkásságáról. Sokan talán a felszólalók közül engem irigyelhetnek a legjobban, hiszen csaknem három évtizeden át tartó időszakból tudok meríteni, amiből 20 évet Tisza professzor közvetlen környezetében éltem meg.

De amennyire irigylésre méltó lehet a helyzetem, oly annyira nehéz is. Hiszen annyi dolog kötött össze minket az által, hogy vele azonos kutatási területen tevékenykedem. Közös oktatott tantárgyak, közös publikációk készítése, utazások ipari partnerekhez, közös részvételek különböző konferenciákon és az ezzel járó hosszú utazások órái, várakozásai reptéri transzferekben.

Ahogy írtam ezeket a gondolatokat eszemben jutott, hogy mit is tudnánk mi most egymásnak mondani, ha valami csoda folytán találkozhatnánk. Kicsit olyan érzésem lenne, mint amikor két egymást régen nem látott jóbarát találkozik. Ott a közös múltbeli történetek felidézéséhez nem kellene szavak, elég lenne csak a közös csend. Sajnos ebben a csendben már csak egyedül vagyok, így nekem kell tovább vinni az emlékeket azok számára, akik nem lehettek az ő közvetlen környezetében.

Csaknem harminc év egy közösség vezetőjeként óriási idő. Ha visszagondolok arra a majdnem három évre, amióta az én felelősségem az Intézetünk vezetése, mennyi kihívással nézett szembe az Intézet közössége, akkor szinte felfoghatatlannak tűnik ez a hosszú idő.

Ha azt is hozzáteszem, hogy ebben három évtizedben benne volt egy teljes politikai rendszerváltás, ami az akkori ipari környezet teljes leépítéséhez, iszonyatos lassúságú vegetálásához, majd a megmaradt romokon az új rendszer kiépítéséhez vezetett, akkor látható, hogy vezetőként neki nem a boldog békeidők jutottak.

Tisza professzor 1991. január elsejével lett az Intézetünk, akkori nevén Mechanikai Technológiai Tanszék vezetője. A 70-es évek végétől a nyolcvanas évek közepéig tartó viszonylagos stabilitás és a kényszerűen bezárkózott magyar ipar sokasodó mérnöki kihívásai egy viszonylagos jólétet eredményezett Intézetünk életében a rengeteg kutatási, szakértési és fejlesztési kihívásoknak köszönhetően. Ezekben az időkben az Intézet létszáma csaknem félszáz fő volt. Ennyi ember irányítása, munkájuk koordinálása nem kis kihívás lehetett az újonnan megválasztott vezetőnek.

A rendszerváltás nehéz időszaka a felsőoktatást is utolérte így a 90-es évek közepére eső komoly megszorítások nem kerültek el az Intézetünket sem. Mostani vezetőként nem irigyelem azokban az időkben meghozott döntések előkészítési folyamatát. Vezetői szemmel akkor ez egy nagyon nehéz időszak lehetett.

A borura azonban mindig derű is érkezik. A 70-es évek viszonylagos jóléte a születések számában is megmutatkozott. Ez a generáció megérkezett meg az Egyetem falai közé a kilencvenes évek első felében. A tankörök létszáma megnövekedett, és az ezzel párhuzamosan folyó folyamatos műszaki fejlődés az Egyetemünk oktatási rendszerének átgondolását hozta magával. Bevezetésre került a modulrendszerű képzés. Ez a tantervek megváltozását, és többet között az Intézetünkben oktatott Hegesztéstechnológiai főmodul átdolgozását is érintette, amelynek folyamatába ő is, sokakkal közösen jelentős szerepet játszott.

Az alapító professzorok által írott tankönyvek az idő haladtával megérették az átdolgozásra, hogy új korszerű ismeretekkel egészüljenek ki. Az ún. tankönyvreform egyik fő mozgatója Intézetünkben Tisza professzor volt. A 2000-es évek első éveiben, jó példával járva elő, az akkor már több éve előadóként oktatott Metallográfia tárgy támogatására, megjelenik a Kar akkori arculatának megfelelő ún. kék csíkos tankönyvcsalád első tankönyve az ő tollából Metallográfia címmel. Ez a tankönyv azóta is az Intézet legtöbb anyagtudományi tárgyának alapköteté. Az évek során a tankönyvet többször ő maga átdolgozta az oktatási rendszer mindenkori átszervezéseit követve. Jelenleg Anyagtudomány alapjai címen forgatja gépészmérnök hallgatók sokasága.

A Metallográfia könyvet további kék csíkos könyvek követik: az Anyagvizsgálat és a Mechanikai Technológiák. Mindegyikben közös, hogy hosszabb-rövidebb fejezetek írásával ő maga is kiveszi részét, sokszor magára vállalva az egységes formátumra szerkesztés aprólékos munkáját is. Elvitathatatlan érdeme, hogy jelenleg a kollégáink egy homogén egységes logikai szellemben megfogalmazott tankönyvcsaládból oktathatják a jövő mérnökeit.

Tisza professzor a 90-es évek elejétől, követve az új idők szeleit az Intézetünkben elsőként nyit, az általa oktatott tárgyak számítógéppel támogatott újszerű megközelítésének oktatásba történő beemlése felé. Ebben, számos intézeti kolléga támogatja, így az alaptantárgyaink mellet megjelennek a számítógéppel támogatott technológiai tervezés alapjait oktató tantárgyak is. Talán nem túlzás állítani, hogy erre alapozva oktat az Intézetünk, a jelenleg egyik legnépszerűbb MSc. szakirányon számos tárgyat.

Tisza professzor önzetlenségét jól példázza, hogy a 2005-ben induló CAD/CAM szakirányon, aminek kidolgozásában szintén elvitathatatlan érdemei voltak, megörököltém az általa a kilencvenes években oktatott Számítógépi technológiai tervezés c. tárgyat megosztotta velem akkori föliáit. Bár közösen utólag jól neveltünk a tárgy azon tananyag részein, ami a számítógép hardverkörnyezetét írta le. Az akkori hallgatók komolyan zavarba jöttek volna olyan fogalmakon, mint például a fényceruza. Ezen részek komoly átdolgozásra kerültek, amiben nem hagyott magamra.

Hiába a számítástechnika tényleg az egyik leggyorsabban fejlődő technológia. Ezért ő maga is folyamatosan követte a számítástechnika fejlődését. Nem tudom pontosan megmondani, de talán nem sok Intézetben volt Chip Magazin előfizetés az akkori időkben, amit évtizedeken keresztül folyamatosan járatot.

Azt is gondolom, hogy nem sok 70-es éveikhez közel álló professzor töltötte azzal az idejével, hogy az egyes szoftverek fejlődését követve, órákat üljön fiatalok mellett, akik megmutatták az új szoftververziók fejlesztéseit. Amit utána ő maga is aprólékos gyakorlással megtanult. Tudásvágya magasabb volt annál, hogy szégyelljen fiataloktól tanulni.

Talán két-három héttel a sajnálatos halála előtt a kórházból írt nekem egy levelet, hogy kimentését kérje egy online tanfolyamról, amin közösen terveztünk részt venni. Azt kérte, hogy a tanfolyam után osszak meg vele minden információt, hogy ne maradjon le az újdonságokról. Sajnos ezeket az információkat már nem tudtam vele megosztani.

És végezetül engedjenek meg egy személyes gondolatot. Tisza professzor úr 1967-ben került a Miskolci Egyetemre. 2021-ben bekövetkezett haláláig 54 éven keresztül minden napját a Miskolci Egyetemért és azon belül is szeretett Intézetért élte. Személye, elhivatottsága és kimeríthetetlen munkabírása máig példaként állhat az őt követők előtt. A mai nappal legalább a személyét visszakaptuk emlékszobor formájában, ami így minket is túlélve visszatért oda, ahová mindig is tartozott a Miskolci Egyetem falai közé.

Köszönöm, hogy meghallgattak.

Elhangzott 2024. június 24-én, Dr. Tisza Miklós professzor emlékszobrának szoboravató ünnepségén, a Miskolci Egyetem Régi aulájában.



Dr. Lukács Zsolt, az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet igazgatója szoboravató emlékbeszédét tartja



Az emlékszobor leleplezésének pillanata: Tisza Miklós özvegye és Dr. Szilágyi Roland, a Miskolci Egyetem rektorhelyettese



Dr. Lukács Zsolt, az Intézet igazgatója; Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán, a Kar dékánja, Tisza Miklós özvegye és Dr. Szilágyi Roland, a Miskolci Egyetem rektorhelyettese



D. Függelék

**A Nippon Steel vállalat képviselőinek látogatása az
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben**

EGYÜTTMŰKÖDÉS A NIPPON STEEL VÁLLALATTAL

Az acéltermékek gyártásával foglalkozó japán Nippon Steel vállalat négyfős delegációja látogatott el a Miskolci Egyetemre 2024. július 4-én. A látogatás előzménye, hogy az Intézet kollégái 2022-ben, a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW) Tokióban megrendezett éves közgyűlésén és konferenciáján vették fel a szakmai kapcsolatot a vállalat képviselőivel.

A Nippon Steel a közelmúltban olyan rozsdamentes acélt fejlesztett ki, amely nagy nyomáson is ellenáll a hidrogén káros hatásának. Ezt a különleges, HYDREXEL márkanévű acélt Japánban számos hidrogéntöltő állomáson használják, ezáltal segítve a hidrogén üzemanyagként történő alkalmazásának elterjedését. Az együttműködés keretében az acélgyártó vállalat ilyen típusú kísérleti acélokat biztosít fizikai szimulációs és törésmechanikai vizsgálatok elvégzéséhez az Intézet számára. Az együttműködés koordinátora Dr. Raghawendra Pratap Singh Sisodia egyetemi docens.



A Nippon Steel delegációja és az Intézet munkatársai

A találkozó során Dr. Lukács Zsolt intézetigazgató bemutatta az Intézet kutatás-fejlesztési tevékenységét. Ezt követően a résztvevők a Nippon Steel vállalatról, valamint a HYDREXEL acél anyagszerkezeti sajátosságairól hallhattak előadást, az acélcső termékek menedzsere Yuhei Suzuki és Dr. Takahiro Osuki kutatási osztályvezető részéről. A japán delegáció további tagjai Masaki Ueyama szenior menedzser és Hayato Tachibana hegesztési kutatómérnök voltak. A találkozó következő előadását Dr. Lukács János professzor tartotta, aki a hidrogén szállításával és tárolásával kapcsolatos kutatási eredményekről számolt be. Az előadások után a delegációt Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán, a Gépészmérnöki és Informatikai Kar dékánja fogadta. Ezt követően került sor a Komplex Mechanikai

Anyagvizsgáló Laboratórium és a Hegesztéstechnológiai Laboratórium megtekintésére, amelynek keretében csőrepszto vizsgálatot láthattak a résztvevők. A szakmai program Prof. Dr. Mertinger Valéria (Fém-tani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet) intézetigazgató előadásával és a 3D Laboratórium bemutatásával zárult.

Ez a találkozó a vállalat és a Miskolci Egyetem közötti együttműködés fontos lépése, amelyet a tervek szerint mindkét fél számára előnyös kutatás-fejlesztési tevékenység követ.



A vendégek és a vendéglátók szakmai eszmecseréje az intézeti könyvtárban



Repsztovizsgáló az Intézet csővizsgáló laboratóriumában

E. Függelék

**75 éves a Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kara
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Szekció**





Prof. Dr. Gerald Wilhelm (Munich University of Applied Sciences) és Dr. habil. Palotás Béla professzor emeritus (Dunaiújvárosi Egyetem) az ünnepi plenáris ülésen



Az ünnepi plenáris ülés résztvevőiről készült csoportkép

ANYAGSZERKEZETTANI ÉS ANYAGTECHNOLÓGIAI SZEKCIÓ

Szekcióelnök neve, beosztása: Prof. Dr. Lukács János egyetemi tanár
Szekciótitkár neve, beosztása: Nagy Nóra tanársegéd
Tervezett helyszín (épület, terem): A/1 épület, 2. em. X. előadó

- 14:00 – 14:15 **Dr. Lukács Zsolt** intézetigazgató, egyetemi docens
75 év öröksége és a jövő kihívásai
- 14:15 – 14:30 **Dr. Gáspár Marcell Gyula** egyetemi docens
Dr. Meilinger Ákos egyetemi docens
Hegesztési és hegesztéstechnológiai kutatások
- 14:30 – 14:45 **Dr. Kuzsella László** egyetemi docens
K+F együttműködések a hőkezelés területéről
- 14:45 – 15:00 **Dr. Kovács Péter Zoltán** egyetemi docens
Kutatási projektek a képlékenyalakítás területéről
- 15:00 – 15:15 **Prof. Dr. Lukács János** egyetemi tanár
Szerkezetintegritás: múlt, jelen és jövő
- 15:15 – 15:30 **Prof. Dr. Gerald Wilhelm** egyetemi tanár
Wire Arc Additive manufacturing of Metal Structures of 17-4Phs



SZÜNET



- 15:45 – 16:00 **Dr. Eng. Nicusor-Alin Sirbu** igazgató
Dr. Eng. Alin-Constantin Murariu tudományos igazgató
Introduction of the Romanian R&D Institute for Welding and Material Testing common projects with the University of Miskolc
- 16:00 – 16:15 **Chován Péter** Csővezetékes Mérnökség vezető
A csővezeték integritás szerepe a földgázszállításban

- 16:15 – 16:30 **Demjén Ferenc** szerszámtervezés csoportvezető
Gyakorlati példák az AutoForm programrendszer napi alkalmazásáról a Hajdu Autechnika Ipari Zrt-nél
- 16:30 – 16:45 **Pausits Valér** ügyvezető igazgató
Együttműködés a hegesztés területén Verarbeiten Pausits Kft. És az Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet között
- 16:45 – 17:00 **Hozzászólások, kötetlen beszélgetés**



Dr. Lukács Zsolt intézetigazgató előadása az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Szekcióban



Az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Szekció résztvevői



Az Intézet tagjainak és vendégeinek egy csoportja az ünnepi plenáris ülésen



