

2021. JANUÁR 28-30.
BUDAPEST

XXX. JUBILEUMI NEMZETKÖZI HEGESZTÉSI ONLINE KONFERENCIA

KONFERENCIA KIADVÁNY



XXX. Jubileumi Nemzetközi Hegesztési Konferencia

2021. január 28-30.

Szerkesztette: Dr. Gáti József

Nyomdai Előkészítés: Kuti János

Felelős kiadó: Magyar Hegesztési Egyesület
Dr. Gáti József elnök

ISBN 978-615-6260-00-0

BIZOTTSÁGOK

A KONFERENCIA FŐVÉDNÖKE

Dr. Palkovics László akadémikus, Innovációs és Technológiai Miniszter

A KONFERENCIA ELNÖKE

Dr. Dr. h. c. Gáti József, a MAHEG elnöke

A KONFERENCIA TÁRSELNÖKEI

Gayer Béla, az MHTÉ igazgatója

Prof. Dr. Trampus Péter, a MAROVISZ elnöke

Dr. Bíró Gyöngyvér, a MAE elnöke

Aszman Ferenc, a MAGÉSZ elnöke

Dr. Nyíró József, a MAJOSZ elnöke

PROGRAMBIZOTTSÁG

Elnök: Gyura László, a MAHEG főtitkára

Tagjai:

Bakos Levente Dr. Gáspár Marcell

Dr. Farkas Attila Prof. Dr. Tóth László

Dr. Gáti József Dr. Májlinger Kornél

Prof. Dr. Jármái Károly Prof. Dr. Réger Mihály

Dr. Tóth László Dr. Palotás Béla

Dr. Fábián Enikő Réka Dr. Kovács Tünde

Illyi János

TECHNIKAI és SZERVEZŐBIZOTTSÁG

Elnök: Kuti János

Tagjai:

Gayer Béla

Kiss Alexandra

Dr. Varga Péter

Nagyné Halász Erzsébet

TÁMOGATÓK

A KONFERENCIA FŐ TÁMOGATÓI



A KONFERENCIA KIEMELT TÁMOGATÓI



A KONFERENCIA TÁMOGATÓI



A KONFERENCIA MÉDIA TÁMOGATÓI



KÖSZÖNTŐ



Tisztelettel köszöntöm a XXX. Jubileumi Nemzetközi Hegesztési Online Konferencia valamennyi résztvevőjét! A 2021-es év kiemelkedő hazai szakmai programja a Magyar Hegesztési Egyesület rendezésében, mely az eddigi legszélesebb együttműködéssel – a Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés, a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete, a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség, a Magyar Acélszerkezeti Szövetség, a Magyar Járműalkatrészgyártók Országos Szövetsége és az Óbudai Egyetem közreműködésével – kerül lebonyolításra.

A kétévente megrendezésre kerülő szakmai rendezvénysorozat szervezői **a szerkezetgyártás korszerű anyagai és kötéstechológiái a XXI. században** témakört helyezték a konferencia tematikájának középpontjába. A résztvevőknek lehetőségük nyílik a plenáris előadások során áttekinteni a gazdaság és szakoktatás politika szakterületünkhöz közel álló legfontosabb témaköreit, és a legfrissebb szakmai információkat megismerni szekcióülések során. Az elhangzó magyar nyelvű előadások ISBN számmal ellátott online kiadványban kerülnek publikálásra.

Ezúton is köszönöm mindazon kollégák kitartó munkáját, akik tevékenységükkel hozzájárultak a konferencia előkészítéséhez és megszervezéséhez. Köszönöm az előadások szerzői, a szekciók elnökei felkészülését, a társszervezetek, a Programbizottság, a Technikai és Szervezőbizottság tagjainak, odaadó gondoskodását.

A Jubileumi Nemzetközi Hegesztési Konferencia alkalmat biztosít arra is, hogy a Magyar Hegesztési Egyesület nagyra értékelve és megbecsülve a hegesztő közösség szolgálatában, fejlődésének elősegítésében, az Egyesület érdekeinek előmozdításában kimagasló, példamutató tevékenységet végző szakembereket, elismerésben részesítse.

Az online Konferencia sikeres és magas színvonalú lebonyolítása érdekében a MAHEG szerződést kötött a Diamond Congress Kft-vel, aki biztosítja a Zoom Webinar technikai lebonyolítását, GDPR szabályok betartását.

Végezetül kívánok a XXX. Jubileumi Nemzetközi Hegesztési Konferencia valamennyi résztvevőjének sikeres szakmai tanácskozást, ismereteik, szakmai és baráti kapcsolataik bővítését, és nem utolsósorban az ismeretek hasznosítását mindennapi munkájuk során!

Budapest, 2021. február 21.

Dr. Dr. h. c. Gáti József
a Konferencia elnöke

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalom

BIZOTTSÁGOK.....	3
TÁMOGATÓK	4
KÖSZÖNTŐ.....	5
TARTALOMJEGYZÉK	6
contents.....	8
NÉVMUTATÓ	9
ÍVHEGESZTŐROBOTOK ALKALMAZÁSI HATÁRAINAK KIBŐVÍTÉSE KORSZERŰ MÓDSZEREKKEL	10
HEGESZTŐK MINŐSÍTÉSE MA ÉS A JÖVŐBEN.....	17
Termomechanikusan hengerelt nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztett kötéseinek tönkremenetele nyíró-szakító és keresztirányú szakító terhelések hatására	28
LYUKKORRÓZIÓ LÉZERSUGARASON HEGESZTETT KORRÓZIÓÁLLÓ ACÉLOKNÁL	37
A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK MÉRÉSE ÉS FEJLESZTÉSE	45
ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉS AZ ELEKTRONSUGARAS ÉS A HUZALELEKTRÓDÁS VÉDŐGÁZOS ÍVHEGESZTÉS ALKALMAZÁSÁRÓL NEMESÍTETT NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKNÁL.....	53
A gyakran használt lánggyengetési technológiák hőciklusai és hatásuk a hegesztett szerkezetek acéljaira	59
A FÉM ADDITÍV GYÁRTÁS AKTUÁLIS HELYZETE , ÚJDONSÁGOK ÉS FEJLESZTÉSI TRENDEK.....	70
Különböző hozaganyagok hatása a kristályosodási repedési érzékenységre, alumínium hegesztésekor	93
HEGESZTETT SZERKEZETEK TERVEZÉSÉNEK KUTATÁSA A MISKOLCI EGYETEMEN.....	104
NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK FIZIKAI SZIMULÁCIÓVAL ELŐÁLLÍTOTT HŐHATÁSÖVEZETEINEK TÖRÉSMÉCHANIKAI VIZSGÁLATAI	119
Korrózióálló acélok szövetszerkezetében végbemenő változások a lézersugaras hegesztési paraméterek függvényében	126
A csővégek geometriai eltéréseinek és a körvarratok elkészíthetőségének kapcsolata terepi körülmények között történő hegesztéskor	131
NUKLEÁRIS KUTATÓREAKTOROKHOZ GYÁRTOTT BERENDEZÉSEK MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSA, HEGESZTÉSE, ANYAGVIZSGÁLATA	139
AUTOMATIZÁLT HEGESZTÉS PEREMFELTÉTELEI	148
Korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztett és egyengetett kötéseinek mechanikai tulajdonságai..	155
Mit és hogyan tanulhatunk a csőtávvezetékek körvarratainak káreseteiből?	164
A FAJLAGOS TÖRÉSI MUNKA ÉS A BEMETSZÉS KINYÍLÁS VIZSGÁLATA S960QL ACÉL ELŐMELEGÍTÉS NÉLKÜL ÉS 150°C-OS ELŐMELEGÍTÉSI HŐMÉRSÉKLETEN HEGESZTETT KÖTÉSEIN.....	170
HEGESZTETT SZERKEZETEK MÉRÉSI LEHETŐSÉGEI FARO VANTAGEE LASER TRACKER ÉS FARO FOCUS S70 LASER SCANNER MÉRŐRENDSZEREKKEL	180
Az ultrahangos és AZ ellenállás ponthegeztés összehasonlítása	193

EGY HEGESZTETT KÖTÉS MARADÓ FESZÜLTSGÉNEK ÜZEMI FESZÜLTSGÉRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK A MEGHATÁROZÁSA NUMERIKUS SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL	199
Különleges ötvözetek ipari alkalmazása. Hegesztési sajátosságai, valamint ezek szabványi háttere.	207
GLOBALIZÁCIÓ, DIGITALIZÁCIÓ, RONCSOLÁSMENTES ÉRTÉKELÉS	215

CONTENTS

Expanding the application limits of ARC welding robots with advanced methods.....	10
QUALIFICATION OF WELDERS TODAY AND IN THE FUTURE	17
Behavior of resistance spot welded thermomechanically rolled high strength steels under tensile shear and cross tension loads	28
Pitting corrosion at laser welded corrosion resistant steels.....	37
THE MEASURING AND DEVELOPMENT OF THE RELIABILITY OF THE NON-DESTRUCTIVE TESTING	45
Comparative study about the electron beam and gas metal arc welding of quenched and tempered high strength steels	53
Heat cycles of FREQUENTLY used flame straightening technologies and their effect on steels in welded structures	59
Current state of the Metal Additive Manufacturing, novelties and development trends.....	70
The effects of different filler materials on the solidification cracking susceptibility in the case of aluminum welding.....	93
RESEARCH ON WELDED STRUCTURE DESIGN AT THE UNIVERSITY OF MISKOLC.....	104
FRACTURE MECHANICAL ANALYSIS OF PHYSICALLY SIMULATED HEAT AFFECTED ZONES IN HIGH STRENGTH STEELS	119
Laser Welding Parameters Effects On microstructure of corrosion resistant steel	126
Relationship between the geometric deviations of pipe ends and the preparation of GIRTH welds in case of Field-work welding.....	131
Quality assurance, welding, material testing of equipment manufactured for nuclear research reactors.....	139
Preconditions of automated welding.....	148
Mechanical properties of welded and straightened joints produced from Advanced High Strength Steels	155
What and how can we learn from the girth welds damages of transporting pipelines?.....	164
Examination of absorbed specific fracture energy and Notch opening displacement on S960QL steel welded joints without Preheating and with 150°C preheating temperature	170
Measurement possibilities of Welded structures with FARO Vantage [®] laser tracker and FARO Focus S70 laser scanner	180
COMPARISON OF THE ULTRASONIC AND THE RESISTANCE SPOT WELDING.....	193
NUMERICAL SIMULATION TO DETERMINE THE EFFECT OF WELDING RESIDUAL STRESS ON OPERATING STRESS OF A WELD JOINT.....	199
Standards background of the special alloys industrial application and welding characteristics	207
GLOBALIZATION, DIGITALIZATION, NON-DESTRUCTIVE EVALUATION	215

NÉVMUTATÓ

Barabás Péter, 10
Bézi Zoltán, 199
Bicsak Péter, 17
Borhy István, 28
Chován Péter, 164
Dr. Balogh András, 59
Dr. Bela Palotas, 155
dr. Fábián Enikő Réka, 126
Dr. Farkas Attila, 10
Dr. Gáspár Marcell, 53, 59
Dr. Grósz Tamás, 139
Dr. Jármay Károly, 104
Dr. Ladányi Péter, 139
Dr. Trampus Péter, 215
Erdős Antal, 104
Gábrriel Miklós, 180
Gyura László, 59
Halász Gábor, 70
Hazim Nasir Ghafil, 104
Hirt Péter, 93
Katula Levente, 93
Kérdy Áron, 10

Koncsik Zsuzsanna, 119, 164
Kovács Ferenc, 126
Kovács Judit, 131
Kovács Tünde Anna, 193
Lakos Szabina, 148
Lama Mkanna, 155
Lukács János, 119, 131, 164, 170
Májlínger Kornél, 93
Nagy Gyula, 119
Nagy Szilárd, 104
Petrik Máté, 104
Sas Illés, 170, 180
Schramkó Márton, 193
Sisodia Raghawendra, 53
Spisák Bernadett, 199
Szabó Kristóf, 10
Szávai Szabolcs, 199
Székely Ferenc, 207
Timcsák István, 53
Török Imre, 164
Varbai Balázs, 93

ÍVHEGESZTŐROBOTOK ALKALMAZÁSI HATÁRAINAK KIBŐVÍTÉSE KORSZERŰ MÓDSZEREKKEL

EXPANDING THE APPLICATION LIMITS OF ARC WELDING ROBOTS WITH ADVANCED METHODS

Barabás Péter

Flexman Robotics Kft.

bp@flexmanrobotics.hu

Dr. Farkas Attila

Flexman Robotics Kft.

fa@flexmanrobotics.hu

Kérdy Áron

Flexman Robotics Kft.

ka@flexmanrobotics.hu

Szabó Kristóf

Flexman Robotics Kft.

szk@flexmanrobotics.hu

A hegesztőrobotok gazdaságos alkalmazási területe a hegesztendő munkadarabok sorozatnagyságát tekintve a közepes és nagysorozatok hegesztésére korlátozódik a köztudatban. Ez valóban sok évtizedig így is volt, azonban az utóbbi évek fejlesztései ennek a felfogásnak az újragondolására készítetnek bennünket. Ezek a fejlesztések főleg a hegesztőrobotok új és a korábbinál hatékonyabb programozási lehetőségeinek megjelenésében öltenek testet. Összeállításunkban erről adunk összefoglalást a Yaskawa fejlesztéseinek tükrében kitérve ennek néhány más összetevőjére is.

According to public knowledge, the economical application area of welding robots –regarding the scale of production –is limited to mid- and large-scale productions. Although this was true for several decades, the developments of the last few years encourage us to reconsider this view. These developments are mainly taking shape in the appearance of opportunities –more effective than ever before –for programming welding robots. The following compilation summarizes this topic in the light of Yaskawa’s developments while covering some other components as well.

1. Bevezetés

Megfigyelve az elmúlt évtizedek fejlesztéseit a hegesztés robotosításában, megállapíthatjuk, hogy ebben a folyamatban megtaláljuk a többé-kevésbé egyenletes fejlesztések eredményeit, mint például a robotok sebességének és pontosságának javulása, az egyre több vezérelhető tengely és szinkronvezérelhető robotok számának növekedése, az egyre ergonomikusabban használható kézi programozó pultok megjelenése, a különböző programozást segítő kényelmi funkciók kifejlesztése. A fejlesztések során voltak azonban olyan mérföldkövek, melyeknek az ívhegesztés robotosítására a fentiekhez képest is átütőbb hatása volt. Ezek között említhetjük a kétezres évek közepén megjelent, ívhegesztési célra kifejlesztett robotkart, az utóbbi évtizedben pedig a programozás területén megjelent újabb lehetőségeket. A legutóbbi években a kollaboratív robotok ívhegesztési alkalmazása nyitott meg egy új területet, azonban ez inkább még útkeresésnek tekinthető, és nem hozható közös platformra a korábbi évek fejlesztéseinek fő céljaival, a robottal hegesztett varratok minőségi és megbízhatósági szintjének emelésével, a hatékonyság javításával és a termelékenység növelésével. Összeállításunkban bemutatjuk az ívhegesztő robotok alkalmazásának főbb sajátosságait is.

2. Hardveres fejlesztések

Az ívhegesztés robotosításában tehát az egyik nagy jelentőségű fejlesztés a hardver tekintetében az *ívhegesztési célra kifejlesztett robotkar* volt, melynek főbb előnyeit a következőkben foglalhatjuk össze:

- Jobb hozzáférési tulajdonságok a nehezen elérhető helyek hegesztéséhez
- A kompaktabb felépítés miatt többrobotos rendszereknél a robotok közelebb kerülhetnek egymáshoz
- A hegesztő munkakábel élettartama a többszörösére nő
- A huzalelőtolás még extrém robotkar helyzetekben is akadálymentes

- A hagyományos on-line közvetett tanítású robotprogramozás ideje rövidül, mert a programozónak nem kell figyelnie programozás közben a hegesztő munkakábel helyzetét.
- Az off-line programozással készülő programoknál rövidebb időt vesz igénybe az off-line program valósághoz adaptálása, mert elmaradhat a robotkábel miatti programkorrekció.

Mindezek az előnyök a villatest-szerű robot felsőkar kialakítással biztosíthatók a legteljesebben, mert itt két oldalról is védett a robotkábel.



1. ábra

A Yaskawa-Motoman ívhegesztő robotjainak fejlesztése

A Yaskawa, mely ezen a területen trendteremtő fejlesztéssel honosította meg ezt az irányt az ívhegesztés robotosításában, az utóbbi években a robotkart még továbbfejlesztette úgy, hogy annak enyhén ívelt kialakításával még jobb hozzáférési lehetőséget kínál elődjénél.

A robot és hegesztőberendezés gyártók közötti együttműködés eredményeképpen az ívhegesztési célra fejlesztett robotkarokhoz kifejezetten ezekhez tervezett hegesztő felszerelések érhetők el, melyek között találunk nagyon jó kompakt megoldásokat, kihasználva a robottest által kínált kedvező lehetőségeket.

A hegesztő berendezések és a robotok közötti kommunikáció módja az utóbbi évtizedben egyértelműen a digitális megoldások felé tolódott el, analóg vezérléssel egyre kevesebbszer találkozunk. A digitális kapcsolatoknál pedig a terepi buszos megoldások mellett a LAN kapcsolaton alapuló megoldások is megjelentek, melyekkel legtöbbször lényegesen nagyobb sebességű és sokrétűbb beavatkozásra van lehetőség a hegesztési folyamatba. Ezeknél tipikusan lehetőség nyílik a hegesztési paramétereket közvetlenül a kézi programozópultról programozni, hasonló módon, mint a kalibrált analóg vezérlés esetén.

A kézi programozópult fejlesztése egyértelműen a könnyebb kezelhetőség, a jelentősen kisebb tömeg irányába hatott az elmúlt években. Az ezzel ergonomikusabbá tett on-line közvetett betanításos programozás hatékonysága javul, a programozási idő rövidítéséhez ez is hozzájárul.



2. ábra

Az on-line közvetett tanítású programozáshoz használt programozó felületek fejlesztései a Yaskawánál

A Yaskawa *Smart pendant* nevű okos programozópult (l. a 2. ábra jobb szélén) a még gyakorlatlanabb programozók számára biztosít hatékonyabb munkavégzést jól áttekinthető nagyméretű érintőképernyős kijelzőjével, fejlett help funkciókkal. Giroszkópos érzékelőjével a robot kézi mozgatásának koordináta tengelyeit képes a programozó pult irányába állítani automatikusan.¹

¹ A Smart Pendant ívhegesztési alkalmazásra történő adaptációja jelenleg folyamatban van.

3. Robotprogramozási és az ezzel kapcsolatos szoftveres fejlesztések

A Yaskawa-Motoman ívhegesztő robotok programozási lehetőségeinek fejlődéséről publikációnkban nemrégiben részletesebben beszámoltunk [1], abból most csak néhány dolgot emelünk ki, melyet témánk tárgyalása szempontjából fontos. Az on-line közvetett tanítású robotprogramozás világszerte még mindig a legelterjedtebben alkalmazott programozási mód. Ez esetben a robotot a kézi programozópult kezelőszerveivel mozgatjuk, de a robot ezt a kézi mozgatást nem jegyzi meg, csak azokat a robotkar-helyzeteket, melyeket egy erre szolgáló nyomógom megnyomásával tárolunk a vezérlés memóriájában, egyidejűleg rögzítve azt, hogy a robotnak milyen mozgásvezérlési móddal és sebességgel kell megközelíteni ezt a pontot. A fő probléma ezzel a programozási móddal, hogy lefoglalja a robotot a programozás, és addig nem termel hasznot a berendezés. Mivel világszerte ez a programozási mód dominált napjainkig, ezért a robotok alkalmazási területét a közepes és nagysorozat gyártásra állította be a szakma azon az alapon, hogy egy adott darab programozási idejét (amíg nem termel a robot) viszonyítva a teljes gyártási sorozat idejéhez jónak kell lenni az arányoknak a megfelelő megtérülés érdekében. Itt megjegyezzük, hogy a sorozat nagysága viszonylagos fogalom, mert ezt a robottal rentábilisan hegeszthető darabszámot az egy darab ciklusideje is jelentősen befolyásolja (tehát mást jelent a nagy darabszám egy autóiipari alkatrésznél, ahol szinte másodpercekben mérhetjük a ciklusidőt, meg megint mást a nehézgépszerkezet gyártásban, ahol ez sokszor órás nagyságrendbe esik). Minél rövidebb tehát egy sorozat, annál lényegesebb, hogy a programozás idejét a lehető legrövidebbre csökkentsük. Nem véletlen, hogy az első off-line programozói szoftverek tipikusan éppen ezen a területen kerültek alkalmazásra.

Az off-line programozói szoftverek használatának elsődleges célja, hogy a robot programjának elkészítéséhez csak minimálisan legyen szükség gépi időt foglalni a roboton: a programozási idő lehető legnagyobb részét a robottól független számítógépen végezzük, és csak a modellterben készült program adaptációjához legyen szükség a lehető legrövidebb ideig a robotra a programozáshoz.

Az off-line programozói szoftverek első generációjánál a programozási idő csökkentéséről nem beszélhetünk, viszont az, hogy a programozás idejének jelentős részét a robotról számítógépre vihetjük át, már itt is nagy előnyt jelentett, különösen a sok programozási műveletet igénylő (és tipikusan a hosszabb ciklusidejű) munkadarabok esetén.

A legújabb fejlesztésű off-line programozói szoftverekkel azonban már a programozás ideje is csökkenthető. Ez köszönhető egyrészt a szoftverek kényelmi funkcióinak, illetve a részben vagy teljes egészében automatikus robotprogram pályagenerálási képességeiknek. Ha a modellter és a valóságos robotcella közötti különbség miatt szükséges adaptációs időt minimalizálni tudjuk (a lehető legpontosabb kalibrációval, illetve a robot intelligens képességeivel, szenzorok alkalmazásával) és ezekkel a szoftverekkel pedig már a teljes programozási idő is jelentősen csökkenthető, akkor a robotok gazdaságos alkalmazhatósága hegeszthető sorozat nagyságát tekintve lényeges elmozdulást láthatunk a kis sorozatok, bizonyos esetekben akár az egyedi gyártás irányába.

4. A fejlesztések stratégiai irányai

Ha összességében megállapítjuk a robotfejlesztések fő célját, a fentiekből is egyértelműen látszik, hogy az a következő pontokban foglalható össze:

- a robotok lehető legmagasabb szintű rendelkezésre állásának biztosítása a termelésben
- A robotok termelékenységének javítása
- Magasabb szintű adaptivitás megvalósítása a helyei eltérések kezelésére
- a kis sorozatok és akár az egyedi gyártás irányába bővíteni gazdaságosan a hegesztő robotok alkalmazási körét.²

Figyelembe véve hardveres és szoftveres fejlesztések bemutatott trendjeit, fent említett célokat a robotfejlesztések a következőkkel kívánják elérni.

- Az on-line közvetett tanítású programozás hatékonyságának javítása, a programozási idő csökkentése
- Az off-line programozás hatékonyságának növelése, a programozási idő csökkentése
- Az off-line programozással elkészült modell-program lehető leggyorsabb adaptálása a valós robotcellához
- A termelékenység javítása elsősorban a robotkarok sebességének fokozásával és az egyre több tengely egyidejű vezérléssel, többrobotos, integrált, magasabb szinten automatizált robotcellák építésével lehetséges
- A robotok adaptív képességeinek biztosítása a mesterséges intelligencia eszköztárának bevetésével, fejlett szenzortechnika alkalmazásával lehetséges.

5. Ívhegesztő kobotok

² A kis sorozatoknál és egyedi gyártásban való hatékony robotalkalmazás tekintetében azonban gondolnunk kell arra is, hogy a munkadarab készülékesét milyen rugalmas módon lehet megoldani. Nyilván nem jó, ha ez szűk keresztmetszetté válik, mert akkor az új programok hiába készülnek el nagyon rövid idő alatt, ha egy újabb készülék előállítására hónapokat kell várni.

Az ívhegesztő kobotok olyan hegesztőrobotok, melyeknél a robot valamilyen általános célú kollaboratív robot, melyre a hagyományos általános célú ipari robotoknál megszokott hegesztő felszerelés van felszerelve és ez a gépegyüttes gyakran kézzel mozgatható mobil platformra van felhelyezve (l. 3. ábra).



3. ábra

Ívhegesztő kollaboratív robotok

Az előző bekezdés alapján felvetődik a kérdés, hogy hogyan helyezhetők el az ívhegesztő kobotok a fent ismertetett fejlesztési trendekben?

Ha a fent ismertetett stratégiai fejlesztési irányokat nézzük, akkor az ívhegesztő kobotok esetén három biztosan kiesik a lehetőségek közül, mert azokat ugyan hatékony és intuitív on-line közvetett betanításos technikával lehet programozni, azonban sebesség tekintetében jóval lassabbak, mint az ipari robotok, nem rendelkeznek mindazokkal az előnyökkel, melyeket az ívhegesztési célra fejlesztett robotok biztosítanak, nem rendelkeznek adaptív képességekkel, intelligens szenzortechnikával. Maradhat még elvileg a negyedik lehetőség, nevezetesen: „a kis sorozatok és akár az egyedi gyártás irányába bővíteni gazdaságosan a hegesztő robotok alkalmazási körét”. Itt viszont a gazdaságosság erősen megkérdőjelezhető, mert ugyanebben az árkategóriában elérhetők normál ipari robottal épített kisméretű kompakt robotcellák is, melyek a robot lényegesen nagyobb sebessége miatt sokkal termelékenyebbek, így a megtérülési idejük is jóval rövidebb, ha kihasználjuk őket.

Nézzük akkor meg, hogy mi lehet a háttérben annak, hogy az ívhegesztő kobotokra ilyen figyelem irányul az utóbbi időben.

Az ívhegesztő kobotokat értékesítő cégek többnyire a következő érvekkel kínálják robotjaikat:

- a) egyszerű programozás
- b) gyors telepítés,
- c) nem kell biztonsági rendszer, ezért olcsóbbak, mint a hagyományos ívhegesztő robotok

Vizsgáljuk most meg ezeket az érveket kicsit alaposabban:

Ad a)

A kollaboratív robotok kézi mozgathatósága megfelelő programozást támogató szoftverrel valóban intuitívvá teszi a robot programozását, és egyszerű programozási műveleteket kezdőknek is könnyebb elvégezni.

Ad b)

A gyors telepíthetőség nem csak a kollaboratív robotok sajátossága, mert kompakt ívhegesztő robotcellákat ugyanolyan gyorsan lehet beüzemelni.

Ad c)

Nagyon leegyszerűsített megközelítés ez az érv, és nem is feltétlenül igaz. A következőkben nézzük meg ezt egy kicsit bővebben.

5.1. Ívhegesztő kobotok üzemeltetésének biztonsági kérdései

Az ívhegesztő kollaboratív robotok biztonsági kérdéseinek vizsgálatakor egyrészt a vonatkozó robotbiztonsági szabályokat kell figyelembe venni, másrészt, és éppen az azokban lévő előírások miatt is, a robotosított eljárás, jelen esetben a MIG/MAG hegesztésre vonatkozó biztonsági előírásokat is, azokkal egyidejűleg.³

A kollaboratív robotokkal az ipari robotokkal kapcsolatos biztonsági szabványokhoz [2], [3] kiegészítésként megjelent műszaki specifikáció foglalkozik [4]. Ebben olvashatjuk, hogy az ember-robot együttműködésnek négy változata van, melyből a köznap szöhasználatban elterjedt kollaboratív robotok a teljesítmény és erőkorlátozással működő berendezések kategóriájába tartoznak. A robotok kollaboratív működésével kapcsolatosan részletesebben a Hegesztéstechnika folyóiratban megjelent publikációnkban beszámoltunk [5]. Ebből itt csak annyit emelnénk ki, hogy a kollaboratív robotokkal kapcsolatos biztonsági szabályozások alapja, hogy az ember és a robot érintkezése nem okozhat sérülést. Ezt viszont nem csak magára

³ Konkrétan az MSZ EN ISO 10218-2:2011 - Robotok és robotszerkezetek szabványból: Ipari robotok biztonsági követelményei 2. rész: Robotrendszer és összehangolásuk 4.2.e) pont, 5.3.14. pont, 5.10.2. pont.

a robottestre kell vonatkoztatni, hanem a komplett robotos munkahelyre, amelybe beletartozik a robotosított, jelen esetben a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztő berendezés minden komponense, továbbá ide tartozik a hegesztő eljárás működéséből adódó expozíciók megfelelő kezelése is.

Az üzembehelyezés⁴ tekintetében jelentős különbség van a hagyományos hegesztő robotcellák és az ívhegesztő kobot munkahelyek között. Főként abban, hogy a hagyományos ívhegesztő robotcellák a gépdirektíva szerinti CE II/A dokumentummal készülnek, mely egy arra vonatkozó nyilatkozat, hogy a komplett robotcella, mint munkahely gépegyüttes megfelel a rá vonatkozó biztonsági előírásoknak (európai irányelveknek, és harmonizált szabványoknak). Ennek a dokumentumnak a megléte az egyik feltétele a sikeres üzembehelyezési eljárásnak. Az ívhegesztő kobotoknál ilyen dokumentumot nem szállít a gyártó a robothoz, csak legfeljebb részben kész gép beépítésre vonatkozó II/B dokumentumot.

A kobotos komplett hegesztési munkahelyre vonatkozó üzembehelyezési eljáráshoz magának a felhasználónak kell a teljes munkahelyre vonatkozó nyilatkozatot, illetve az ezzel egyenértékű dokumentumot elkészíteni, vagy szakértő cég által elkészíttetni. Ehhez jóval széleskörűbb és átfogóbb kockázatelemzést kell végeznie a felhasználónak, mint a hagyományos ívhegesztő robotcellák esetén. Arra vonatkozóan, hogy mit kell ilyenkor vizsgálni, a Yaskawa Nordic AB szempontrendszer dolgozott ki, melyet a 4. ábrán mutatunk be.

Ehhez tegyük hozzá, hogy láthatunk az ívhegesztő kobotok mellett olyan érvet is, hogy könnyen áthelyezhetők. Ez fizikailag igaz is, azonban a fentiek alapján könnyen belátható, hogy minden egyes újabb munkahelyre az ottani körülmények figyelembe vételével újra el kell végezni az üzembehelyezése eljárást az adott munkakörülményekre vonatkozó kockázatelemzéssel együtt.

A fenti elemzésből (figyelembe véve a 4. ábrán bemutatott szempontrendszert) az is következik többek között, hogy amennyiben a kollaboratív ívhegesztő robot hegesztése közben, a robot mellett, annak közvetlen közelében akar valaki mindenképpen munkát végezni, akkor azt csak komplett hegesztési védőruházatban, hegesztő pajzsban teheti meg. A kérdés, hogy ilyen komplett védőfelszerelésben milyen más munkát tud ott végezni a dolgozó, és annak milyen további kockázata van. Pl. hegesztő pajzsban nem nagyon lát egyébként a dolgozó, hiszen, még ha fényre sötétedő pajzsot is használ, az ívfény minduntalan lesötétíti a látóteret.

Gépdirektíva hivatkozás	Ellenőrzendő	Megjegyzés
1.1.2	Teljesítmény és erő mérés - Sebesség és érzékenység a (sérülést nem okozó) specifikáció szerint beállítva.	Jegyzőkönyvezett mérés szükséges
1.1.2	A kezelő oktatása	Kötelező
1.1.4	A munkahely megfelelő megvilágítása	Szükség szerint
1.1.5	Szállítási és emelési előírások	A használati utasítás szerint
1.1.6	Az ideális munkamagasság 850 és 950 mm között van-e	Szükség szerint állítani kell a munkasztól magasságát
1.1.7		
1.4.2	Hegesztési füst, EMC and UV kibocsátás elleni védelem.	L. használt utasítás
1.5.10		
1.2.2	A programozó pult könnyű elérése munka közben	L. Weld wizard kézikönyv.
1.3.2	Terhelés és távolságok a használt utasítás, a berendezés rajza és a kockázatelemzés szerint.	Ellenőrizni kell minden alkalmazásra!
1.3.1	Eshetnek-e le vagy repülhetnek-e ki tárgyak a hegesztőasztalról a nem megfelelő rögzítés miatt a munkadarab és a robot ütközése során?	Ellenőrizni kell minden alkalmazásra!
1.3.3	A munkadarab és a készülékfelületeinek, éleinek kiszögéléseinek kockázata. Amennyire azok funkciója lehetővé teszi, nem lehetnek éles élek, hegyes kiszögélések, durva felületek, melyek sérülést okozhatnak.	Ellenőrizni kell minden alkalmazásra!
1.3.4		

⁴ Itt jegyezzük meg, hogy az üzembehelyezés nem a beüzemelést jelenti, hanem alatta azt a jogi fogalmat értjük, mely magába foglalja azt az eljárást, melynek végeredményeképpen a munkáltató elrendeli az adott munkaeszköz használatba vételét. Ennek előfeltétele egy előzetes munkavédelmi szempontú vizsgálat, melyet ehhez megfelelő végzettségű szakember végez el vizsgálva a gépdirektívának és a magyar munkavédelmi jogszabályoknak való megfelelést, a szükséges dokumentációk meglétét, melynek része többek között a gyártó által a berendezésre kiadott EK megfelelőségi nyilatkozat (a kész gépre, ez esetben robotcellára vonatkozó CE II/A dokumentum) megléte.

Gépdirektiva Hivatkozása	Ellenőrzendő	Megjegyzés
1.3.6 1.5.13	A berendezés által kibocsátott hegesztés füst belégzésének kockázatát el kell kerülni! A hegesztő eljárásnak és hegesztett anyaghoz megfelelő füstelszívás szükséges.	Kötelező
1.3.8	Meg kell róla bizonyosodni, hogy a robot kollaboratív módban van!	A robotkezelő megfelelő oktatása és utasítása szükséges!
1.3.8.2	A kezelőnek a hegesztő eljárásnak megfelelő egyéni védőeszközöket kell használnia!	Megfelelő minőségű hegesztő kesztyű, védőruházat szükséges. L. használati utasítás.
1.3.8.2	A hegesztő kábelköteg megfelelő rögzítése a robotkaron.	L. használati utasítás
1.4.1	A berendezés által létrejött hegesztési fröcskölés elleni védelem.	Kötelező
1.5.2	Megfelelő testelés	L. használati utasítás
1.5.5	Forró felületek: fröcskölés és hegesztőfej gázfúvóka	Megfelelő minőségű hegesztő kesztyű, védőruházat szükséges. L. használati utasítás.
1.5.7	Robbanásveszélyes közegben tilos használni!	Ellenőrizni kell minden alkalmazásnál!
1.5.8	Ellenőrizni kell a zajt és a lehető minimálisra csökkenteni!	Személyi védőeszközt vagy külső védőeszközt használni!
1.7.4	Megbizonyosodni arról, hogy a használati utasítás minden kezelő számára hozzáférhető.	Kötelező
3.1.1	A Weld4Me robotot szilárd felületre kell elhelyezni!	L. használati utasítás

4. ábra

A Yaskawa Nordic ajánlásai A Weld4Me ívhegesztő robot üzembehelyezési eljárásához szükséges kockázatértékeléshez, a Gépdirektiva megfelelő előírásai alapján

Összhangban a robotbiztonsági szabványokkal, a Yaskawa Weld4Me ívhegesztő kollaboratív robotjának gépkönyve egy lehetséges alkalmazási példát mutat be, mely szerint a robot munkatere felett helyi elszívást kell kiépíteni, a robotos munkahelyet a fényvédelmet megfelelően biztosító védőfüggönnyel kell körbe venni, és a dolgozóknak a robot működése ezen kívül kell tartózkodni. [6]

Sajnos az interneten nagyon sok olyan ívhegesztő kobotos hiranyag található, videós alkalmazási példákkal, ahol ezeket a biztonsági előírásokat teljesen figyelmen kívül hagyják, és azt sugallják, hogy az ívhegesztő kollaboratív robotok közvetlen közelében mindenféle védőfelszerelés nélkül lehet dolgozni. Csak azért nem közlünk itt konkrét hivatkozásokat, mert nem akarunk egy céget sem rossz hírbe hozni ezzel.

6. Összefoglalás

Az ívhegesztő robotok fejlesztésének alapvető célja többek között a robotok teljesítőképességének javítása, a minél rövidebb megtérülési idő biztosítása, a robotok egyre jobb kihasználása. Írásunkban bemutattuk, hogy ezen célok megvalósítása irányában a hardveres és szoftveres fejlesztésekkel nagyon sokat fejlődött a technika. Különösen a programozás hatékonyságának javításával kitolódott az ívhegesztő robotok gazdaságos alkalmazhatósága a kisebb sorozatok, akár az egyedi gyártás területére is. Az utóbbi években megjelent kollaboratív ívhegesztő robotok a gyártói ajánlások szerint ugyancsak a kis sorozatok hegesztése területén adhatnak alternatív megoldást egyszerűbb munkadarabok hegesztése esetén. Ugyanakkor az ívhegesztő kobotoknak a vonatkozó biztonsági előírások betartása melletti gazdaságos alkalmazhatósága sok kérdést felvet még. Elemzésünk szerint az ívhegesztő kobotok alkalmazása nem illeszkedik be a főáramú robotfejlesztésekbe az ívhegesztés robotosításánál, sokkal inkább egyfajta útkeresésnek tekinthető.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Farkas Attila, Barabás Péter: A Yaskawa-Motoman ívhegesztő robotok programozási lehetőségeinek fejlődése Hegesztéstechnika XXXI. Évfolyam 2020/2 pp. 21-26.
- [2] MSZ EN ISO 10218-1:2011 - Robotok és robotszerkezetek. Ipari robotok biztonsági követelményei. 1. rész: Robotok
- [3] MSZ EN ISO 10218-2:2011 - Robotok és robotszerkezetek. Ipari robotok biztonsági követelményei. 2. rész: Robotrendszerek és összehangolásuk
- [4] 9. ISO TS/15066:2016 – Robotok és robotszerkezetek. Kollaboratív robotok
- [5] Dr. Farkas Attila, Szabó Kristóf: Hegesztő robotrendszerek kialakítása a munkabiztonsági szempontok figyelembevételével Hegesztéstechnika XXXI. Évfolyam 2020/1 pp. 61-67.
- [6] Yaskawa Nordic AB: Weld4Me Installation Safety ME00131EN-00 p. 16.

HEGESZTŐK MINŐSÍTÉSE MA ÉS A JÖVŐBEN

QUALIFICATION OF WELDERS TODAY AND IN THE FUTURE

Bicsak Péter
TÜV Rheinland InterCert Kft.

peter.bicsak@hu.tuv.com

Annak ellenére, hogy az acélhegesztők minősítésének szabványa, az MSZ EN ISO 9606-1 már több éve él, a szabványt még mindig érdemes áttekinteni. Ez a része az előadásnak a szabvánnyal kapcsolatban tapasztaltakra nyújt betekintést. Az áttekintés azért is érdemes, mert ez a szabvány az alapja az ISO/WD 9606:2020-as szabványtervezetnek, ami az MSZ EN ISO 9606-1, -2, -3, -4, -5 szabvány összeolvasása révén bevezetésre kerül hamarosan. Ennek a szabványtervezetnek a főbb érvényességi tartományai kerülnek ismertetésre az előadás másik felében.

Despite the fact that the standard for the certification of steel welders, MSZ EN ISO 9606-1, has been in use for several years, the standard is still worth reviewing. One part of the presentation provides an insight into the experience with the standard. The review is also worthwhile because this standard is the basis of the draft standard ISO / WD 9606: 2020, which will be introduced soon by merging the standard MSZ EN ISO 9606-1, -2, -3, -4, -5. The other part of the presentation the main areas of validity of this draft standard are described.

1. Bevezetés

1.1 Acélhegesztők minősítésének szabványváltozási előzményei

Az MSZ EN ISO 9606-1 – Hegesztők minősítése. Ömlesztőhegesztés 1.rész: Acélok – szabvány 2014. márciusában jelent meg hazánkban. Ekkor, még a szabványátállási időszakban egymással párhuzamosan érvényben volt az MSZ EN 287-1:2012-es szabvány is. 2015. október 1-e után már csak az MSZ EN ISO 9606-1:2014-es szabványt alkalmazva lehetett az acélhegesztőket minősíteni.

A 2014/68/EU (PED) irányelvnek és 2014/29/EU (SPVD) irányelvnek a harmonizálása az MSZ EN ISO 9606-1:2017-es megjelenésével rendeződött. A 2017-ben kiadott szabvány a 2014-es kiadáshoz képest a műszaki tartalmában nem változott. Változást a ZA melléklet frissítése és egy ZB melléklettel történő kiegészítés jelentette, mely a fentebb megnevezett PED, SPVD irányelveknek való harmonizációt elégítette ki.

2019-ben megalkották az ISO/WD 9606:2019 szabványtervezet, melynek az életbe lépése 2020-ra volt várható, azonban vélhetően a pandémiás helyzet ez felülírta. 2020-ban a szabványügyi testület egy újabb szabványtervezettel állt elő 2020 októberében, ISO/WD 9606:2020, melynek az életbe lépésére 2021-ben számítunk.

Ez az ISO/WD 9606:2020 szabvány váltaná a 9606-os szabványcsaládot. Összevonva a „Hegesztők minősítés. Ömlesztőhegesztés.” szabványokat, az MSZ EN ISO 9606-1:2017 – acélok; az MSZ EN ISO 9606-2:2005 – alumínium és alumíniumötvözetek; az MSZ EN ISO 9606-3:2001 – réz és rézötvözetek; az MSZ EN ISO 9606-4:2001 – nikkel és nikkelötvözetek; valamint az MSZ EN ISO 9606-5:2000 – titán és titánötvözetek, cirkónium és cirkónium ötvözetek című szabványokat.

2. MSZ EN ISO 9606-1 alkalmazási tapasztalatai

Az MSZ EN ISO 9606-1 szabvány, a Hegesztők minősítés. Ömlesztőhegesztés. 1.rész Acélok címet viseli. A szabvány lényeges változója a hegesztési hozaganyag. A hozaganyagokat a szabvány 2. táblázata csoportosítja. A szabvány 3. táblázata a minősítő vizsgán használt hozaganyaghoz tartozó érvényességi hozaganyagcsoportokat jelöli.

2.1 Megfelelő hozaganyag megválasztása

Az FM4, melegsziárd acélokhoz ($3,75\% \leq \text{Cr} \leq 12\%$) használt hozaganyaggal végzett minősítés érvényes FM1, FM2, FM3, FM4-es hozaganyagcsoportra. Az CR ISO 15608 szabvány szerinti 6-os anyagcsoport hegesztésénél, FM4-es hozaganyag használatával a gyökvédőgáz használata elengedhetetlen. Ebben az esetben a vizsgázó minősítésének szabványos megnevezése ss gb rövidítéssel zárul. Az érvényességi terület ennek megfelelően pedig lekorlátozódik a szabvány 11. táblázata alapján hegfürdő-megtámasztással (ss mb); kétoldali-hegesztés (bs) és gyökvédő gáz alkalmazásával (ss gb) történő hegesztésre. Ebben az esetben az CR ISO 15608 szabvány 1-es alapanyagcsoportjába tartozó terméknel is csak az előbb felsorolt (ss mb, bs, ss gb) kivitelezési módok egyikével történhet a hegesztés, vagyis a hegfürdő-megtámasztás nélküli (ss nb) hegesztésre a hegesztő minősítés nem érvényes.

Javasolt megoldásként, kihasználva, hogy a lényeges paraméter a hozaganyag, az CR ISO 15608 szabvány 5 anyagcsoportjába tartozó vizsgadarabot hegeszt a vizsgázó FM4-es hozaganyaggal. Ebben az esetben elhagyható a gyökoldali gázvédelem a vizsga során, vagyis a vizsgadarab hegesztés hegfürdő-megtámasztás nélkül (ss nb) történik.

Amennyiben a vizsgán FM6-os, nikkal és ötvözetek hozaganyag csoportba tartozó hegesztőanyagot használnak, úgy az érvényes lesz FM5 korrózió és hőálló acélok, valamint az FM6-os csoport hegesztésére. Korábban említésre került az MSZ EN ISO 9606-1 lényeges változója a hozaganyag. Amennyiben az alapanyag (nikkel és ötvözetek) a fontos a megrendelőnek, úgy az MSZ EN ISO 9606-4:2001 szabvány alkalmazása javasolt.

A hozaganyaggal végzett hegesztés érvényes hozaganyag nélküli hegesztésre. A 142 és 311 hozaganyag nélküli minősítés esetén arra az alapanyagra vonatkozik, amit a minősítésen használtak. Ilyen esetben kiemelten szükséges az alapanyag megválasztására odafigyelni.

111, 141, 135, 136, 138-as eljárásnál, amennyiben a vizsga hegesztés hegfürdő-megtámasztás nélkül (ss nb) történik, úgy a minősítővizsgán a gyökréteghez használt hozaganyag típusa egyezzen meg a gyártás során a gyökréteghez használt hozaganyag típusával. Vagyis erre, a szabvány általi kikötésre szükséges odafigyelni.

131, 135, 138-as eljárásnál a rövidzárlatos (D) üzemmódban végzett vizsga érvényes más anyagátmenetre is, de fordítva nem. Amennyiben lehetséges alkalmazzunk rövidzárlatos üzemmódot (is) a minősítővizsga folyamán.

2.2 Hegesztési helyzet megválasztása

Az MSZ EN 287-1-es szabvány alkalmazásánál a H-L045 pozíció cső tompa hegesztése érvényes volt PA, PC, PE, PF, PH és H-L045 pozícióra.

Az MSZ EN ISO 9606-1 esetében a szabvány 9. táblázatában található a tompavarratok hegesztési helyzetének érvényességi tartománya. Ez a táblázat az érvényességi tartományból azonban kihagyja a PH, PJ, H-L045 és a J-L045 pozíciókat. H-L045 hegesztési pozíció ebben az esetben PA, PC, PE, PF pozícióra érvényes.

Az MSZ EN ISO 9606-1 szabvány 5.8. fejezete lehetőséget ad a H-L045 vagy a J-L045 pozíció megszerzésére. Ekkor két azonos külső átmérőjű, egy PH és egy PC helyzet hegesztése H-L045-re, még egy PJ és egy PC hegesztési pozíció J-L045-re is kiterjeszti az érvényességi tartományt.

Cső külső átmérője $D \geq 150$ mm esetén a vizsgadarab meghegeszthető két hegesztési helyzetben (2/3 PH vagy PJ, 1/3 PC helyzetben). Az érvényességnél figyelembe kell venni a vizsgán alkalmazott mindkét hegesztési helyzetet, melyet egy minősítésre fel lehet vezetni.

Az MSZ EN ISO 9606-1 szabvány 10. fejezete kitér az összevont minősítés kiállítására. Amennyiben a hegesztő több vizsgadarabot készít, kiállítható egy minősítési bizonyítvány, amelynek tartalmaznia kell a vizsga minden lényeges paraméterét. A három lényeges paraméter (varratípus, hegesztési helyzet, varratvastagság) közül egy módosítható egy közös minősítés kiállításához.

2.3 Vizsgálati hossz igazolása

Alapszabály, hogy 150 mm vizsgált hosszt kell igazolni.

- Ahogy már az említett $D \geq 150$ mm esetén a PH/PC vagy a PJ/PC hegesztési helyzetet le lehet egy darabon hegeszteni.

- $D = 48$ mm adja ki a szükséges 150 mm kerületet.
- $D \leq 48$ mm esetén több darab hegesztése szükséges. A lehegesztett csövek külső kerülete érje el a 150 mm-t, de maximum 3 db-ot kell készíteni a vizsgázónak.

2.4 Érvényességi idő választása

Az MSZ EN ISO 9606-1 szabvány három féle lejárati lehetőséget kínál fel a felhasználónak.

9.3. a) 3 évig érvényes

9.3. b) 2 évig érvényes és további 2 évig megújítható

9.3. c) Nincs konkrét időbeli lejárati.

Az időbeli lejárati a megrendelőnek a vizsga előtt meg kell, hogy határozza. A sikeres minősítések ezek alapján kerülnek kiállításra, amit utólag nem lehet módosítani.

Időbeli érvényességből eredő probléma:

- MSZ EN ISO/IEC 17024 akkreditációval rendelkező tanúsító szervezetek, a személytanúsítási követelmény szabvány szerint nem állíthatnak ki érvényességi idő megadása nélküli minősítést.
- PED II. III. IV veszélyességi kategóriába sorolt berendezéseknél valamint az SPVD termékeknél nem fogadható el a 9.3. c) pontja felhasználásával kiadott minősítések.
- AD 2000-Mbl. HP3 is csak 9.3. a) és b) pontja szerinti minősítést fogad el.

2.5 Méretbeli érvényesség

A $D > 25$ mm átmérőjű csövek esetén az érvényességi tartomány $\geq 0,5D$, de legalább 25 mm. Ennek alapján látható, hogy nem érdemes túl nagy átmérőt választani, mert hasznos érvényességi tartomány eshet ki. Továbbá 25 és 48 mm közötti átmérőt sem célszerű választani, mert darabszámban 2 darabot kell elkészíteni, hogy a 2.3 pontban említett 150 mm vizsgálati hosszt elérjük.

Tompavarratnál a vizsgadarab varratvastagsága adja meg az érvényesség alapját.

Kombinált eljárásnál pl.: 141/111 s10(3/7) esetén három érvényesség kerül számításra. Egy csak 141-es eljáráshoz tartozó érvényességi tartomány, egy csak 111-es eljáráshoz tartozó érvényességi tartomány és egy 141/111-es érvényességi tartomány. $S \geq 12$ mm tompavarrat esetén az érvényesség ≥ 3 mm.

Sarokvarratnál a vizsgadarab vastagsága adja az érvényesség alapját. Nem célszerű túl vastag anyagot hegeszteni, ugyanis már 3 mm vastagságú lemezzel el lehet érni a $t \geq 3$ mm érvényességi tartományt.

2.6 Vizsgálati lehetőségek

Az MSZ EN ISO 9606-1 13. táblázatának és a táblázatban megfogalmazott megjegyzések többféle vizsgálati lehetőséget nyújtanak, melyekkel igazolható a vizsgadarab megfelelősége.

Minden darabot szemrevételezéses vizsgálatl kötelező vizsgálni.

A példaként hozott vizsgadarab paraméterei: 135 P BW FM1 S s10 PF ss nb.

A 13. táblázat alapján az alábbi módon vizsgálható a minősítő darab:

- Teljes darab hajlítóvizsgálatával;
- Teljes darab törésvizsgálatával;
- Radiográfiai vizsgálat + kiegészítő hajlítóvizsgálattal;
- Radiográfiai vizsgálat + kiegészítő törésvizsgálattal;
- Ultrahangos vizsgálattal.

Tehát az öt vizsgálati mód közül eggyel kell igazolni a szabványnak való megfelelést a példaként hozott darabunknál.

2.7. Minősítések 2 éves megújítása

Az MSZ EN ISO 9606-1 szabvány 9.3 b) pontja szerinti lejárattal kiállított minősítés további 2 évre meghosszabbítható.

A hosszabbításhoz a hegesztési felelős fél éves igazolásain túl, az utolsó félévből két hegesztési varrat megfeleltre értékelt radiográfiai, ultrahangos vagy roncsolásos vizsgálata szükséges. A vizsgált varrat feleljen meg az eredeti vizsgának, kivéve a vastagság és cső átmérője.

A nemzeti előszóba foglaltaknak eleget téve, az elméleti tesztet ismételten meg kell írni a hosszabbításhoz, függetlenül attól, hogy történik-e hegesztés vagy anyagvizsgálati jegyzőkönyvvel történik a meghosszabbítás. Az elméleti teszt kitöltését a minősítő vagy a tanúsító szervezet jelenlétében kell lefolytani. Megfelelés esetén 2 évre lehetséges a megújítás.

2.8. Minősítések valódiságának ellenőrzés

A tanúsítók a védelmi szintek növelésével próbálják meg visszaszorítani a hamisítási próbálkozásokat. Alkalmazznak QR kódos azonosítást, melyet beolvasva megkapjuk a hegesztő nevét, a tanúsítvány kiadásának dátumát, a hegesztés, érvényesség dátumát, a minősítés jelölését és a vizsgálati számát. Gyakran változtatják a tanúsító szervezetek a tanúsítvány papír, a bélyegzőket (száraz, nedves bélyegzők).

Javasolt minden esetben az eredeti minősítés bekérése, mivel a hamisítványok jellemzően csak másolatok formájában kerülnek elő. A másolatokon a mai számítástechnikai és nyomdatechnikai eszközökkel számos visszaélést el lehet követni. Amennyiben az eredeti tanúsítvány nem áll rendelkezésre, úgy a tanúsító szervek készséggel állnak rendelkezésre a minősítések valódiságának igazolásával kapcsolatban.

3. ISO/WD 9606:2020 szabványtervezet áttekintése

ISO/WD 9606:2020 szabványtervezet a „Hegesztők minősítése. Ömlesztőhegesztés” címet viseli. Az 1. táblázatban felsorolt EN ISO 9606-os szabványcsaládot egy szabványba fogja össze. A szabványtervezet alapját az EN ISO 9606-1 szabvány adja. Pozitívumnak tekinthető, hogy egységesség lesz az anyagvastagság érvényességi tartományában, a hegesztési pozíciókban, a szükséges anyagvizsgálatokban és a tanúsítványok lejáratí idejét illetően. Aktualizálásra kerültek a hegesztési és anyagvizsgálati szabványok is. Egyszerűbb lesz a direktívákra történő harmonizálás, illetve a tanúsítóknak az akkreditáció.

Szabvány száma	A szabvány címe
MSZ EN ISO 9606-1:2017	Hegesztők minősítése. Ömlesztőhegesztés. 1. rész: Acélok
MSZ EN ISO 9606-2:2005	Hegesztők minősítése. Ömlesztő hegesztés. 2. rész: Alumínium és alumíniumötvözetek
MSZ EN ISO 9606-3:2001	Hegesztők minősítése. Ömlesztő hegesztés. 3. rész: Réz és rézötvözetek
MSZ EN ISO 9606-4:2001	Hegesztők minősítése. Ömlesztő hegesztés. 4. rész: Nikkel és nikkelötvözetek
MSZ EN ISO 9606-5:2000	Hegesztők minősítése. Ömlesztő hegesztés.

A szabványtervezet 5. fejezete foglalkozik a minősítés lényeges paramétereivel és érvényességi tartományával.

Lényeges paraméterek:

- Hegesztési eljárás (ok)
- Terméktípus (lemez vagy cső)
- Varrattípus (tompa vagy sarokvarrat)
- Hozaganyagcsoport
- Hozaganyagtípus
- Méret (anyagvastagság és cső külső átmérője)
- Hegesztési helyzet
- Hegesztéstechnikai adatok (pl.: egyrétegű, többretegű, jobbra hegesztés, balra hegesztés, hegfürdő megtámasztás stb.)

3.1. Hozaganyagcsoportok

3.1.1. Hozaganyagcsoportok – acél

Az acélok hozaganyagcsoportosítása (szabványtervezet 3. táblázata) megegyezik az EN ISO 90606-1-ben ismertetett csoportokkal.

Table 3 — Steel filler material grouping

Group	Filler material type	Examples of applicable standards
FM1	Non-alloy and fine grain steels	ISO 2560, ISO 14341, ISO 636, ISO 14171, ISO 17632
FM2	High-strength steels	ISO 18275, ISO 16834, ISO 26304, ISO 18276
FM3	Creep-resisting steels $0.3\% \leq \text{Cr} < 3.75\%$	ISO 3580, ISO 21952, ISO 24598, ISO 17634
FM4	Creep-resisting steels $3.75 \leq \text{Cr} \leq 12\%$	ISO 3580, ISO 21952, ISO 24598, ISO 17634
FM5	Stainless and heat-resisting steels	ISO 3581, ISO 14343, ISO 17633
FM6	Nickel and nickel alloys	ISO 14172, ISO 18274

A hozaganyaghoz tartozó érvényességi tartomány a szabványtervezet 4. táblázatában található, mely szintén egyezőséget mutat az EN ISO 90606-1-el.

Table 4 — Range of qualification for filler material -steels

Filler material	Range of qualification					
	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6
FM1	X	X	—	—	—	—
FM2	X	X	—	—	—	—
FM3	X	X	X	—	—	—
FM4	X	X	X	X	—	—
FM5	—	—	—	—	X	—
FM6	—	—	—	—	X	X

X indicates those filler materials for which the welder is qualified.

3.1.2. Hozaganyagcsoportok – alumínium

Alumíniumhoz használt hozaganyagcsoportosítását a tervezet 5. táblázata tartalmazza.

Table 5 — Aluminum filler material grouping

Group	Filler material type	Examples of applicable standards
FM21	Aluminum Low Alloyed	ISO 18273 Grades per Table 1
FM22	Aluminum Magnesium	ISO 18273. Grades per Table 1
FM23	Aluminum Silicon	ISO 18273. Grades per Table 1 except for those assigned FM26
FM24	Not used	None
FM25	Aluminum Copper	ISO 18273. Grades per Table 1
FM26	Aluminum Silicon Copper	ISO 18273 Al 4009, Al 4145, R-C355.0

Bármelyik hozaganyagcsoporttal történő hegesztés feljogosítja a hegesztőt a többi anyagcsoportú hozaganyaggal történő hegesztésére.

3.1.3. Hozaganyagcsoportok – réz

Az ISO/WD 9606:2020 szabványtervezet 6. táblázata kategorizálja a réz és ötvözetéhez használható hozaganyagokat.

Table 6 — Copper filler material grouping

Group	Filler material type	Examples of applicable standards
FM31 Copper	CuAg-1, CuSn-1, CuSn1MnSi, Cu, CuMn2, CuMn2(A)	ISO 24373, ISO 17777
FM32 Copper Silicon	CuSi2Mn1, CuSi3Mn1, CuSi2Mn1Sn1Zn1, CuSi2Mn, CuSi3Mn, CuSi3	ISO 24373, ISO 17777
FM33 Copper Tin	CuSn5P, CuSn6P, CuSn8P, CuSn10MnSi, CuSn12P, CuSn5P, CuSn6P, CuSn7, CuSn13, CuSn8P, CuSn8P(A)	ISO 2473, ISO 17777
FM34 Copper Nickel	CuNi10, CuNi30Mn1FeTi, CuNi10Mn, CuNi30Mn2FeTi	ISO 2473, ISO 17777
FM35 Copper Zinc	CuZn40SnSi, CuZn40Sn, CuZn40SnSiMn, CuZn40Ni, CuZn40Fe1Sn1, CuZn40Ni10Sn1	ISO 2473, ISO 17777
FM36 Copper Aluminium	CuAl5Ni2Mn, CuAl7, CuAl10Fe1, CuAl11Fe3, CuAl8Fe4Mn2Ni2, CuAl8Fe2Mn2, CuAl9Ni5Fe3Mn2, CuAl8Fe3, CuAl9, CuAl9Ni2Fe, CuAl9MnFe, CuAl9Ni5Fe4Mn2, CuAl10Fe	ISO 2473, ISO 17777
FM37 Copper Manganese	CuMn13Al8Fe3Ni2, CuMn13Al7Fe3Ni2	ISO 2473, ISO 17777

A vizsgázó a vizsga során használt hozaganyagcsoportra megkapja ez érvényességet. Amennyiben a használt hozaganyag és az alapfém ugyanabba a csoportba tartozik, abban az esetben a 7. táblázatban található hozaganyagcsoportok alkalmazására is feljogosítja a hegesztőt.

Table 7: Range of qualification for filler material - copper

Material group of approval test piece ISO 15608 Group	Range of approval						
	FM31	FM32	FM33	FM34	FM35	FM36	FM37
FM31	★	—	X	X	X	—	—
FM32	—	★	—	—	—	X	—
FM33	—	—	★	—	—	—	—
FM34	—	—	—	★	X	—	—
FM35	—	—	—	X	★	—	—
FM36	—	X	—	—	—	★	—
FM37	—	—	—	—	—	—	★
★ indicates the material group for which the welder is approved in the approval test X indicates those material groups for which the welder is also approved — indicates those material groups for which the welder is not approved NOTE: This table applies only when parent metal indicated by ★ and filler metal are in the same group.							

3.1.4. Hozaganyagcsoportok – nikkel

Az ISO/WD 9606:2020 tervezet 8. táblázata csoportosítja a nikkel hozaganyagokat.

Table 8 — Nickel filler material grouping		
Group	Filler material for welding of	Examples of applicable standards
FM41 Nickel	NiTi3	ISO 18274, ISO 14172
FM42 Nickel Copper	NiCu30Mn3Ti, NiCu27Mn3Nb, NiCu25Al3Ti	ISO 18274, ISO 14172
FM43 Nickel Chrome Iron	NiCu15Fe8Nb, NiCr15Fe8NbMo, NiCr14Fe4NbMo, NiCr15Fe8NbMoW, NiCr16Fe12NbMo, NiCr30Fe9Nb, NiCr15Fe6Mn, NiCr25Fe16CoMo3W, NiCr36Fe7Nb, NiCr28Fe6W, NiCr25Fe10Al3YC, NiCr29Fe26Mo, NiFe30Cr25Mo, NiCr44Ti, NiCr38AlNbTi, NiCr20, NiCr20Mn3Nb,	ISO 18274, ISO 14172
FM44 Nickel Moly	NiMo28Fe5, NiMo25Cr3Fe5, NiMo19WCr, NiMo20WCu, NiMo24Cr8Fe6, NiMo26, NiMo30Cr, NiMo28Fe4Cr, NiMo28Fe, NiMo17Cr7, NiMo25Cr5Fe5, NiMo19WCu, NiMo20WCu, NiMo25, NiMo24Cr8Fe6, NiMo28, NiMo30Cr, NiMo28Fe4Cr	ISO 18274, ISO 14172
FM45 Nickel Chrome Moly	NiCr22Fe18Mo, NiCr22Mo9, NiCr21Mo13W3, NiCr26Mo14, NiCr29Mo5Fe15W2, NiCr22Mo20, NiCr23Mo16, NiCr23Mo16Cu2, NiCr25Mo16, NiCr15Mo16Fe5W3, NiCr15Mo15Fe6W4, NiCr19Mo15, NiCr16Mo15Ti, NiCr14Mo7Fe, NiCr22Mo9Nb, NiCr21MoFeNb, NiCr20Fe14Mo11WN, NiCr21Mo16W4, NiCr22Mo77Fe19, NiCr22Co12Mo	ISO 18274, ISO 14172
FM46	ENiCrFeSiI	ISO 18274, ISO 14172

Bármelyik hozaganyaggal történő hegesztés feljogosítja a hegesztőt az összes többi hozaganyagcsoport alkalmazására.

3.1.5. A hozaganyagcsoportok – titán és cirkónium

Az ISO/WD 9606 tervezet 9. táblázata csoportosítja a titán és cirkónium hegesztéséhez használt hozaganyagokat.

Table 9 — Titanium and Zirconium Filler material grouping		
Group	Filler material type	Examples of applicable standards ^a
FM51	ERTi-1, 11, 13, 17, 27, etc.	ISO 24034
FM52	ErTi-4,	ISO 24034
FM53	ERTi-9, 9ELI, 18, 20	ISO 24034
FM54	ERTi-12	ISO 24034
FM55	ERTi-5, 23, 29, 24, 25, 38	ISO 24034
FM56	ERTi-32	ISO 24034
FM61	ERZr-2, 3, 4	ISO 24034
^a There are no ISO standards for zirconium welding consumables.		

Bármelyik hozaganyaggal történő hegesztés szintén feljogosítja a hegesztőt az összes többi hozaganyag alkalmazására.

3.2. A hozaganyagtypus

A szabványtervezet 10. 11. táblázata a hozaganyagtypusok érvényességi mátrixát tartalmazza.

Table 10 — Range of qualification for covered electrodes – all parent materials^a

Welding process	Type of covering used in the test ^b		Range of qualification					
	Europe	Pacific Rim	Europe	Pacific Rim	Europe	Pacific Rim	Europe	Pacific Rim
			A, RA, RB, RC, RR, R	03, 12, 13, 14, 19, 20, 24, 27	B	15, 16, 18, 28, 45, 48	C	10, 11
111	A, RA, RB, RC, RR, R	03, 12, 13, 14, 19, 20, 24, 27	X		—			—
	B	15, 16, 18, 28, 45, 48	X		X			—
	C	10, 11	—		—			X
X indicates those filler material types for which the welder is qualified.								
— indicates those filler material types for which the welder is not qualified.								

Table 11 — Range of qualification for filler material types – all parent materials^a

Filler material types used in test piece	Range of qualification			
	S	M	B	R, P, V, W, Y, Z
Solid wire electrode, rod (S)	X	X	—	—
Metal cored electrode, rod (M)	X	X	—	—
Flux cored electrode, rod (B)	—	—	X	X
Flux cored electrode, rod (R, P, V, W, Y, Z)	—	—	—	X
X indicates those filler material types for which the welder is qualified.				
— indicates those filler material types for which the welder is not qualified.				
^a The type of flux cored wire used in the qualification test of welders for root run welding without backing (ss, nb) is the type of flux cored wire qualified for root run welding in production with no backing (ss, nb).				

Az 'a' megjegyzés értelmében, amennyiben a hegesztés hegfürdő-megtámasztás nélkül (ss nb) történik, úgy a minősítővizsgán a gyökérteghez használt hozaganyag típusa egyezzen meg a gyártás során a gyökérteghez használt hozaganyag típusával.

3.3. Anyagvastagság és csőátmérő tartományok

A vizsgadarab méreteit illetően nincs változás az EN ISO 9606-1-hez képest. A tervezet 12, 13, 14 táblázatában találhatók az anyagvastagságokra és a csőátmérőkre vonatkoztatott érvényességi tartományok. A tompavarrat hegesztésénél a varratvastagság a mértékadó, sarokvarratnál pedig az anyagvastagság, mint az EN ISO 9606-1-ben tapasztalható.

Table 12 — Range of qualification of deposited thickness for butt welds – all parent materials

Deposited thickness of test piece <i>s</i> mm	Range of qualification ^{a,b} mm
$s < 3$	s to 3^c or s to $2s^d$ whichever is greater
$3 \leq s < 12$	3 to $2s^d$
$s \geq 12^{e,f}$	$\geq 3^f$
^a For single process and the same type of filler material, <i>s</i> is equal to parent material <i>t</i> .	
^b For branch joints, the range of qualification for deposited thickness is:	
— for set-on branch, see, for example, Figure 1 a), the deposited thickness of the branch;	
— for set-through and set-in branches, see, for example, Figure 1 b) and c), the deposited thickness of the main pipe or shell.	
^c For oxyacetylene welding (311): s to 1.5s	
^d For oxyacetylene welding (311): 3 to 1.5s	
^e The test piece is to be welded in at least 3 layers	
^f For multi-processes, <i>s</i> is the deposited thickness for each process.	

Table 13 — Range of qualification for outside pipe diameter – all parent materials

Dimensions in millimetres	
Outside pipe diameter of test piece ^a D	Range of qualification
$D \leq 25$	D to $2D$
$D > 25$	$\geq 0,5D$ (25 mm min.)
^a For non-circular hollow sections, D is the dimension of the smaller side.	

Table 14 — Range of qualification of material thickness for fillet welds – all parent materials

Dimensions in millimetres	
Material thickness of test piece ^a t	Range of qualification
$t < 3$	t to $2t$, or 3, whichever is greater
$t \geq 3$	≥ 3
^a When $t1 < 3$ mm and $t2 \geq 3$ mm, the range of qualification for each thickness shall be considered separately	

3.4. Hegesztési pozíció

A tervezet 15., 16. táblázata tartalmazza a pozíciókhoz kapcsolódó érvényességi tartományokat. Ez is az EN ISO 9606-1-el mutat hasonlóságot.

Table 15— Production welding positions qualified – butt welds – all parent materials

Testing position	Production welding positions qualified ^a				
	Flat (PA)	Horizontal (PC)	Overhead (PE)	Vertical up (PF)	Vertical down (PG)
PA	X	—	—	—	—
PC	X	X	—	—	—
PE (plate)	X	X	X	—	—
PF (plate)	X	—	—	X	—
PH (pipe)	X	—	X	X	—
PG (plate)	—	—	—	—	X
PI (pipe)	X	—	X	—	X
PH-L045	X	X	X	X	—
PI-L045	X	X	X	—	X
NOTE See also 5.3.					
X indicates those welding positions for which the welder is qualified.					
— indicates those welding positions for which the welder is not qualified.					
^a The main welding position in accordance with ISO 6947 can be used on the certificate for the range qualified for production welding.					

Table 16 — Production welding positions qualified – fillet welds – all parent materials

Testing position	Production welding positions qualified						
	Flat (PA)	Horizontal (PB)	Horizontal (PC)	Overhead (PD)	Overhead (PE)	Vertical up (PF)	Vertical down (PG)
PA	X	—	—	—	—	—	—
PB	X	X	—	—	—	—	—
PC	X	X	X	—	—	—	—
PD	X	X	X	X	X	—	—
PE (plate)	X	X	X	X	X	—	—
PF (plate)	X	X	—	—	—	X	—
PH (pipe)	X	X	X	X	X	X	—
PG (plate)	—	—	—	—	—	—	X
PJ (pipe)	X	X	—	X	X	—	X
NOTE — See also 5.3.							
X indicates those welding positions for which the welder is qualified.							
— indicates those welding positions for which the welder is not qualified.							

3.5. Hegesztéstechnikai adatok

A 17., 18. táblázatban található a minősítővizsga során alkalmazott hegesztéstechnikai adatokhoz tartozó érvényességi tartomány.

Table 17 — Range of qualification for backings and consumable inserts

Test condition	Range for qualification for backing and consumable inserts					
	No backing (ss,nb)	Material backing (ss,nb)	Welding from both sides (bs)	Gas backing (ss,gb)	Consumable insert (ci)	Flux backing (ss,fb)
No backing (ss,nb)	X	X	X	X	—	X
Material backing (ss,nb)	—	X	X	—	—	—
Welding from both sides (bs)	—	X	X	—	—	—
Gas backing (ss,gb)	—	X	X	X	—	—
Consumable insert (ci)	—	X	X	—	X	—
Flux backing (ss,fb)	—	X	X	—	—	X
X indicates those conditions for which the welder is qualified.						
— indicates those conditions for which the welder is not qualified.						

Table 18 — Range of qualification of layer technique for fillet welds

Test piece	Range of qualification ^a	
	Single layer (sl)	Multi-layer (ml)
Single layer (sl)	X	—
Multi-layer (ml) ^a	X	X
X indicates the layer technique for which the welder is qualified.		
— indicates the layer technique for which the welder is not qualified.		
^a During the welding of the test piece, the examiner shall mark the stop and restart point of the first layer in accordance with Clause 6.3.		
^b When a welder has qualified using a multi-layer butt weld and they make the supplementary fillet weld test described in 5.4 c), they are qualified for both multi- and single layer fillet welds.		

3.6. Vizsgálati módok

A vizsgadarabok vizsgálatához tartozó táblázat (tervezet 19. táblázata) alapja szintén az EN ISO 9606-1. Azonban a táblázat értelmezése egyértelműbb, jobban átlátható.

Table 19— Test methods

Welding process(es)	Butt welds	Fillet welds (including branch joints)
11L, 114, 121, 125, 136, 141, 142, 143, 145 and 15	VT and RT or VT and UT or VT and BT or VT and FT	VT and FT or VT and ME or VT and TT
131, 135, 138 and 311	VT and RT and BT or VT and RT and FT or VT and UT or VT and BT or VT and FT	VT and FT or VT and ME or VT and TT
VT – visual testing in accordance with ISO 17637 RT – radiographic testing in accordance with ISO according to ISO 17636 UT – ultrasonic testing in accordance with ISO 17640 only for ferritic steels ≥ 8 mm BT – bend testing in accordance with ISO 5173 FT – fracture testing in accordance with ISO 9017 ME – macroscopic examination in accordance with ISO 17639 with at least two sections, and at least one from start/stop location TT – tensile testing in accordance with ISO 4136 with notched test of the complete test piece for diameters ≤ 25 mm.		

3.7. Lejáratí módok

A tervezet három féle lejárati enged meg.

9.3. a) 3 évig érvényes

9.3. b) 2 évig érvényes és további 2 évig megújítható

9.3. c) Nincs konkrét időbeli lejárati.

A 9.3 c) vélhetően a 2. fejezetben ismertetett okok miatt kizárásra fog kerülni.

4. Összefoglalás

Vélhetően a 2021-ben megjelenik az ISO 9606-os összevont szabvány. A szabványt alkalmazzuk bátran, használjuk ki a szabvány adta lehetőségeket az érvényességi területek növelése érdekében. Fordítsunk időt a számunkra legkedvezőbb érvényességet jelentő hozaganyag, a megfelelő méretű, átmérőjű vizsgadarab kiválasztására.

A hamis tanúsítványok elkerülése érdekében csak eredeti minősítő tanúsítványt fogadjunk el a hegesztőktől. Szükség esetén forduljunk a tanúsító testületekhez a tanúsítvány eredetiségének igazolásáért.

Irodalomjegyzék

[1] MSZ EN ISO 9606-1:2017 Hegesztők minősítése. Ömlesztőhegesztés.

1. rész: Acélok

[2] ISO/WD 9606:2020 Hegesztők minősítése. Ömlesztőhegesztés.

TERMOMECHANIKUSAN HENGERELT NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTETT KÖTÉSEINEK TÖNKREMENTELE NYÍRÓ- SZAKÍTÓ ÉS KERESZTIRÁNYÚ SZAKÍTÓ TERHELÉSEK HATÁSÁRA

BEHAVIOR OF RESISTANCE SPOT WELDED THERMOMECHANICALLY ROLLED HIGH STRENGTH STEELS UNDER TENSILE SHEAR AND CROSS TENSION LOADS

Borhy István
TÜV Rheinland InterCert Kft.

iborhy@hu.tuv.com

A vasúti járművek szekrényvázát bordákkal merevített lemezhéjazat jellemzi, amely a járműre ható összes terhelést az alvázal közösen viseli. Az egyes szerkezeti elemek lemezburkolatai maguk is részt vesznek a szerkezet merevségének kialakításában valamint a jármű hossztengetelyével párhuzamos erők felvételében. A differenciált építési módú acélszerkezetek az elmúlt évtizedekben jellemzően kis szilárdságú, jól alakítható lágyacél ötvözetekből készültek. Az elmúlt évek anyagfejlesztései azonban lehetőséget biztosítanak a nagyszilárdságú termomechanikusan hengerelt acélok vasúti járműgyártásban történő alkalmazására. Jelen cikkünkben a VoestAlpine által fejlesztett Alform® 700 típusú nagyszilárdságú acélból készült vékonylemezek ellenállás-ponthegeaszthetőségével összefüggő kutatási eredmények kerülnek ismertetésre, különös tekintettel az anyagszerkezeti változások figyelemmel kísérésére alapozott összetett hegesztéstechnológia kidolgozására.

The body structure of railway vehicles generally made by ribs-stiffened shell structures, this structure bear the load together with chassis. Each structural element of shell structure participates in insurance of the structure's stiffness, and they helps to presences the forces parallel to the longitudinal axis of the railway vehicle. The differential designed vehicle structures generally made of mild steel alloys, these alloys have smaller strength but have better ductility. The results of material development of the last years ensures to use thermomechanicaly rolled high strength steels in manufacturing of railway vehicles. We present in this lecture the results of our research in the field of resistance spot weldability of thin-walled height strength steel (type Alform® 700, developed by VoestAlpine) structures. The main scope of the research is to elaborate a complex resistance welding process for railway industry.

1. Bevezetés

Napjainkban a járművek saját tömegének csökkentése iránti igény a vasúti járműszerkezetek esetén is előtérbe került, hiszen az önsúly csökkentése révén jelentős energia felhasználás takarítható meg miáltal a károsanyag-kibocsátás csökkenthető. A járműszerkezetek tömegének csökkentésére irányuló törekvések előtérbe helyezték a nagyszilárdságú acélok alkalmazását. Az elmúlt évek anyagfejlesztései lehetőséget biztosítanak a nagyszilárdságú termomechanikusan hengerelt acélok vasúti járműgyártásban történő alkalmazására.

Tekintettel arra, hogy a termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztethetőségével kapcsolatosan nem áll rendelkezésre kellő tapasztalat, ezért indokolt az optimális hegesztéstechnológiai paraméterek technológiai kísérletekkel történő meghatározása. Korábbi publikációinkban [1, 2] bemutattuk az Alform® 700 M típusú termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélból készült vasúti járműszerkezetek (teherkocsi oldal- és homlokfalak lemezburkolatainak) ellenállás-ponthegesztési technológiájának kidolgozásával összefüggésben elvégzett kutatómunka motivációját és eredményeit. Jelen publikációban ezen acélok ellenállás-ponthegesztett kötéseinek nyíró-szakító és keresztirányú szakító vizsgálatából levonható következtetéseket ismertetjük.

2. Hegesztett vasúti járműszerkezetekre vonatkozó követelmények

A vasúti járműszerkezetek tervezése során az EN 15085-3 szabvány [3] követelményeit szükséges figyelembe venni, melynek F melléklete részletezi az ellenállás-ponthegesztett kötések minőségére vonatkozó előírásokat. A szabvány a varratminőség tekintetében két lényeges paramétert határoz meg. Egyrészt a nyíró-szakító erő minimális értékére vonatkozó követelményeket adja meg az alapanyag szakítószilárdságának függvényében, másrészt az elektród benyomódási mélységére (deformációra) vonatkozó határértékek alapján sorolja be a ponthegesztett kötések.

Fontos megjegyezni, hogy a nyíró-szakító erő minimális értékére vonatkozó követelmény (EN 15085-3 szabvány F4 táblázata) nem terjed ki a 620 MPa szakítószilárdságot meghaladó acél alapanyagokra. Egyéb előírás hiányában az AWS D8.1M ajánlást [4] vettük figyelembe. Az ajánlás iránymutatást ad a minimálisan elfogadható nyíró-szakító erő (STS_{min} [kN]) értékére (1):

$$STS_{min} = \frac{4 \cdot (-6,36 \cdot 10^{-7} \cdot R_m^2 + 6,58 \cdot 10^{-4} \cdot R_m + 1,674) \cdot R_m \cdot t^{1,5}}{1000} \quad (1)$$

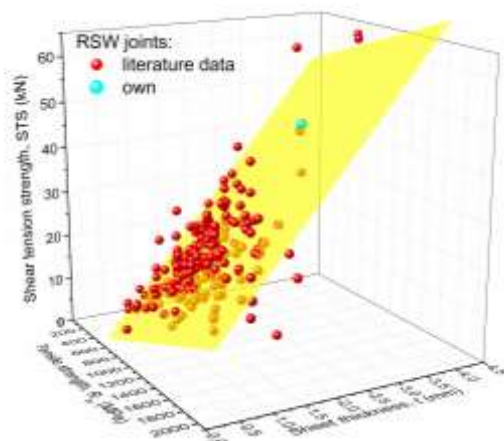
ahol: STS_{min} [kN] nyíró-szakító erő minimális értéke
 R_m [MPa] az acél szakítószilárdsága
 t [mm] a lemezvastagság.

A kísérleteink során alkalmazott $t = 3$ mm-es lemezek (Schmelze: 862432 / Blech-Nr.: 576545) bizonylatolt vizsgálati értékeit az 1. táblázat részletezi.

Megnevezés	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KV _{-20 °C} [J]
Alform® 700 M	767	818	18	-

1. táblázat
Mechanikai tulajdonságok

Az alapanyag szakítószilárdsága (R_m [MPa]), a mért nyíró-szakító erő (STS [kN]) és a lemezvastagság közötti összefüggést a szakirodalmi adatok alapján – megközelítőleg 100 db publikáció eredményeire támaszkodva – [5] részletezi. Az Alform® 700 M típusú termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acél esetén az általunk vizsgált $t = 3$ mm vastagságú próbatestekre vonatkozó STS_{min} (Alform 700) [kN] számított értéke (30,38 kN) az 1. ábrán látható.



1. ábra

Nagyszilárdságú acélokból készült ponthegesztett kötések mért nyíró-szakító erő értékei (STS [kN]) a szakirodalmi adatok alapján ill. az Alform® 700 M acél minimálisan elfogadható nyíró-szakító erő (STS_{min} [kN]) értéke

3. Hegesztési kísérletek

A célkitűzésekhez illeszkedő hegesztési kísérletek végrehajtására a Dunaújvárosi Egyetem Hegesztő Laboratóriumában, P.E.I.-Point PFP 281 típusú inverteres, középfrekvenciás, háromfázisú ellenállás-hegesztő berendezésen (névleges teljesítmény: 114 kVA, maximális hegesztőáram: 13,2 kA) került sor. A kísérletek során egyszerű munkarendet alkalmaztunk. Az alkalmazott elektród: csomkakúp végződésű elektród (MSZ EN 25184 szabvány szerinti A típus), melynek véglap átmérőjét a $d_e = 5\sqrt{t}$ [mm] összefüggés figyelembevételével $\varnothing 10$ mm-ben határoztam meg.

A kísérlettervezés célja, hogy meghatározzuk, a bemenő paraméterek (input faktorok) milyen mértékben befolyásolják a célfüggvényt. A hegesztési kísérletek megtervezéséhez – az optimális technológiai paraméterek meghatározása érdekében – válaszfelület alapú, Box-Wilson módszert [6] alkalmaztunk. A Box-Wilson kísérlettervezési módszer alapja, hogy az általunk felvett tervközépponthoz képest az optimális tartomány a legnagyobb gradiens irányába található. A kísérletterv létrehozásához a Minitab 17 szoftvert alkalmaztuk, ami jó lehetőséget biztosított a válaszfelület alapú modellezéséhez és az eredmények statisztikai kiértékeléséhez.

A kísérlettervezés során alkalmazott standardizált változókat és a variációs intervallumok szélességét az előkísérletek alapján határoztuk meg (2. táblázat)

Mennyiség	Standardizált változók	Mértékegység	Tervközéppont	Delta	+1	-1
Hegesztési idő (t_h)	X_1	periódus	18	2	16	20
Áramerősség (I_h)	X_2	kA	11	1	12	10
Elektróderő (F_e)	X_3	daN	1200	100	1300	1100

2. táblázat
Standardizált változók és variációs intervallumok

Két kísérletsorozatot hajtottunk végre. Az első esetben a hegesztett kötések megfelelőségét a nyíró-szakító erő, a benyomódási mélység és a pontátmérő alapján értékeltük, míg a második esetben a keresztirányú szakítóerő, a benyomódási mélység és a pontátmérő értékét vizsgáltuk. Az összetett célfüggvény mindkét esetben a legnagyobb elérhető szakító erő volt a benyomódási mélység minimalizálása mellett.

Fröcskölést mindkét kísérletsorozat esetén 4. számú próbatest ($t_h=20$ per, $I_h=12$ kA, $F_e=1200$ daN) esetén észleltünk. Ezen próbatest eredményeit a fröcskölés okán nem megfelelőnek minősítettük, azonban a vizsgálatokat ezen próbatestek esetén is elvégeztük.

4. Vizsgálati eredmények

A készre hegesztését követően a próbatesteken az elektród benyomódási mélységét (e_t [mm] az MSZ EN ISO 17677-1 szabvány [7] szerint) mérőóra segítségével megmértük, majd az MSZ EN ISO 14273:2016 szabvány [8] szerinti nyíró-szakítóvizsgálatot ill. MSZ EN ISO 14272:2016 szabvány [9] szerinti keresztirányú szakítóvizsgálatokat végeztünk. A kombinált optimum meghatározását követően az optimális beállításokkal hegesztett kötésekről makro- és mikroszerkezeti felvételeket készítettünk ill. az MSZ EN ISO 14271:2017 szabvány [10] szerinti HV0,2 mikrokeménység vizsgálatokat végeztünk. A szakítódiaagrammok alatti terület integrálásával a törésig elnyelt munkát számítottuk.

4.1 Nyíró-szakító vizsgálatok

Az elvégzett nyíró-szakító vizsgálatok eredményeit a 3. táblázat részletezi.

Sorszám	Áramerősség [kA]	Idő [per]	Idő [ms]	Erő [daN]	Benyomódás [%]	Benyomódás [μm]	Nyíró-szakító erő [kN]	Összetett jósági fok
1	10	18	360	1100	7	210	22,9	0,39
2	12	16	320	1200	10	300	25,2	0,31
3	12	18	360	1100	11	330	38,6	0,42
4	12	20	400	1200	13	390	45,4	0,25
5	12	18	360	1300	12	360	39,9	0,30
6	11	16	320	1100	9	270	27,6	0,38
7	10	18	360	1300	7	210	21,2	0,26
8	11	20	400	1100	10	300	38,3	0,48
9	10	16	320	1200	5	150	19,4	0,03
10	11	18	360	1200	10	300	31,7	0,44
11	11	16	320	1300	9	270	27,2	0,39
12	11	18	360	1200	8	240	28,5	0,44
13	11	20	400	1300	11	330	33,9	0,34
14	10	20	400	1200	9	270	25,8	0,30
15	11	18	360	1200	9	270	28,5	0,44

3. táblázat
Első kísérletsorozat eredményei (nyíró-szakító erő és elektród benyomódási mélység)

A kötések részleges kigombolódással ill. egyes esetekben nyíródással mentek tönkre. A vizsgálatok során rögzítettük az összetett optimumhoz tartozó erő-elmozdulás értékeket. Megállapítottuk, hogy az alakváltozás a tönkremenetel után is folytatódik, ami szívós tönkremenetelre utal.

Az első kísérletsorozat eredményei alapján meghatároztuk az optimális hegesztési paramétereket (4. táblázat).

Technológiai paraméter	Mértékegység	Érték
Hegesztési idő (t_h)	ms	380
Áramerősség (I_h)	kA	10,9
Elektróderő (F_e)	daN	1100

4. táblázat
Optimális hegesztési paraméterek a nyíró-szakító vizsgálat alapján

Az optimális hegesztési paraméterekkel készített kötések esetén a nyíró-szakító vizsgálatok eredményeit az 5. táblázat részletezi.

Sorszám	Áramerősség [kA]	Idő [per]	Idő [ms]	Erő [daN]	Benyomódás [%]	Benyomódás [μm]	Nyíró-szakítóerő [kN]	Összetett jósági fok
16/1	10,9	19	380	1100	4,1	125	37,3	0,54
16/2	10,9	19	380	1100	4,1	125	37,2	0,54
16/3	10,9	19	380	1100	4,5	135	36,9	0,50
16/4	10,9	19	380	1100	4,3	130	37,1	0,52
16/5	10,9	19	380	1100	4,5	135	37,0	0,50
Átlag:				4,3	130	37,1	0,52	

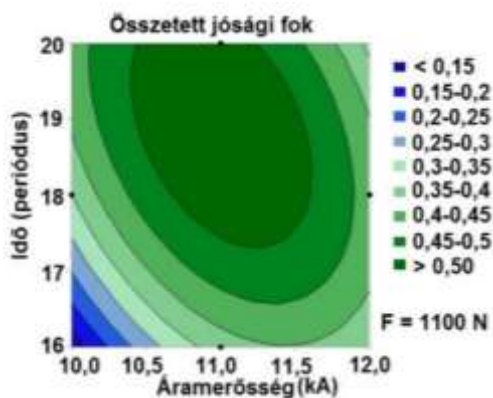
5. táblázat
Optimális hegesztési paraméterekkel készített varratok vizsgálatának eredményei

Az optimális hegesztési paraméterekkel készített hegesztett kötés nyíró-szakító vizsgálata során kapott eredményt összevetettük az AWS D8.1M ajánlás által számított értékkel (6. táblázat).

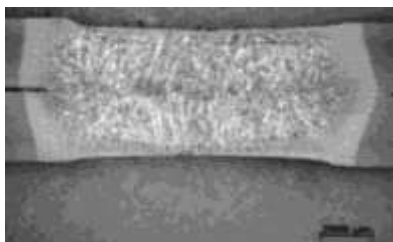
Minimálisan elfogadható nyíró-szakító erő értéke az AWS D8.1M ajánlás alapján	Optimális hegesztési paraméterekkel készített varratok nyíró-szakító erejének átlagértéke	Különbség
STS_{min} [kN]	F_{nysz} [kN]	%
30,38	37,10	+22,1

6. táblázat
Nyíró-szakító vizsgálat eredményének összevetése a minimálisan elfogadható nyíró-szakító erő értékével

A 2. ábrán az összetett jósági fok értéke látható a hegesztési idő és az áramerősség függvényében. Az összetett jósági fok (composite desirability) értéke azt a technológiai paraméter tartományt határozza meg, ahol a kitűzött célfüggvény értékét egyidejűleg sikerül kielégíteni. Amennyiben a célváltozók súlyozása egyenlő (azaz egyenlően fontos számunkra mindkét érték), akkor az összetett jósági fok az egyes egyéni jósági fokok mértani átlagaként számolható.



2. ábra
Az összetett jósági fok értéke a hegesztési idő és az áramerősség függvényében



3. ábra
Alform® 700 alapanyag nyíró-szakító erőre és benyomódási mélységre optimalizált technológiai paraméterekkel hegesztett kötésének makrociszolati képe
($t_h=19$ per, $I_h=10,9$ kA, $F_e=1100$ daN)

A 3. ábrán az optimális hegesztési paraméterekkel készült hegesztett kötés (16/6 számú nyíró-szakító próbatest) makroszkopikus képe látható ($e_f=0,128$ mm, pontátmérő $d_L=10,7$ mm).

4.2 Keresztirányú szakító vizsgálatok

Az elvégzett keresztirányú szakító vizsgálatok eredményeit a 7. táblázat részletezi.

Sorszám	Áramerősség [kA]	Idő [per]	Erő [daN]	Erő [daN]	Benyomódás [%]	Benyomódás [μm]	Kereszt szakító erő [kN]	Összetett jóváági fok
1	10	18	360	1100	7	210	14,47	0,52
2	12	16	320	1200	10	300	13,88	0,33
3	12	18	360	1100	11	330	21,17	0,43
4	12	20	400	1200	13	390	16,65	0,18
5	12	18	360	1300	12	360	18,72	0,27
6	11	16	320	1100	9	270	13,75	0,36
7	10	18	360	1300	7	210	11,47	0,33
8	11	20	400	1100	10	300	15,67	0,36
9	10	18	320	1200	5	150	11,05	0,00
10	11	18	360	1200	10	300	22,90	0,62
11	11	16	320	1300	9	270	11,90	0,14
12	11	18	360	1200	8	240	18,60	0,62
13	11	20	400	1300	11	330	14,01	0,21
14	10	20	400	1200	9	270	13,70	0,26
15	11	18	360	1200	9	270	18,90	0,62

7. táblázat

Második kísérletsorozat eredményei (keresztirányú szakítóerő és elektród benyomódási mélység)

A kötések a keresztirányú szakítóvizsgálat esetén vagy a pontvarrat középvonalában (a két lemez síkjában) kiszakadással vagy a hegesztett lencse kiszakadásával (körkörös nyíródéssel) mentek tönkre. A 4.a-b ábrán mindkét tönkremeneteli módra egy-egy példa látható.



4.a ábra

A pontvarrat középvonalában kiszakadással történő tönkremeneteli mód (6. számú próbatest)



4.b ábra

A hegesztett lencse kiszakadásával történő tönkremeneteli mód (3. számú próbatest)

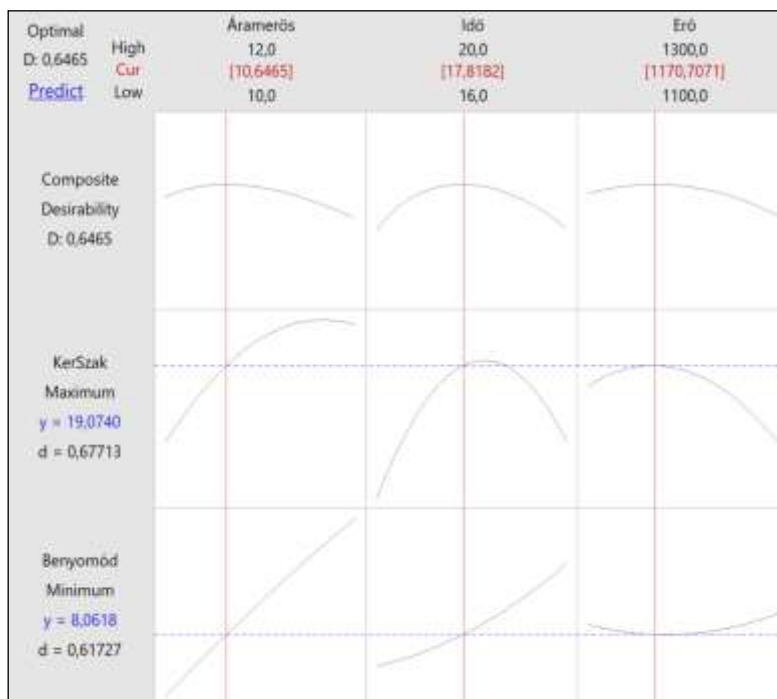
A második kísérletsorozat eredményei alapján is meghatároztuk az optimális hegesztési paramétereket (8. táblázat).

Technológiai paraméter	Mértékegység	Érték
Hegesztési idő (t_h)	ms	360
Áramerősség (I_h)	kA	10,6
Elektróderő (F_e)	daN	1200

8. táblázat

Optimális hegesztési paraméterek a keresztirányú szakító vizsgálat alapján

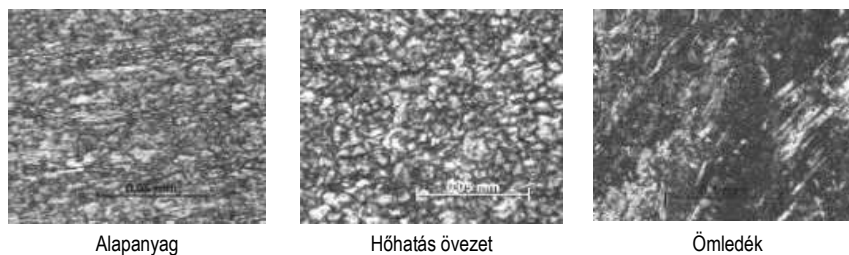
A hegesztéstechnológiai paraméterek (t_h [per], I_h [kA], F_e [daN]) hatását az összetett jósági fok értékére, valamint a keresztirányú szakítóerőre és a benyomódási mélységre az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra

Technológiai paraméterek hatása az összetett jósági fok értékére, valamint a keresztirányú szakítóerőre és a benyomódási mélységre

A 6. ábrán az optimális paraméterekkel készült hegesztett kötés (16/6 számú keresztirányú szakító próbatest) alapanyagból, a hőhatás övezetből (HAZ) ill. az ömledékből kivett mikrosziszlati képei láthatók:

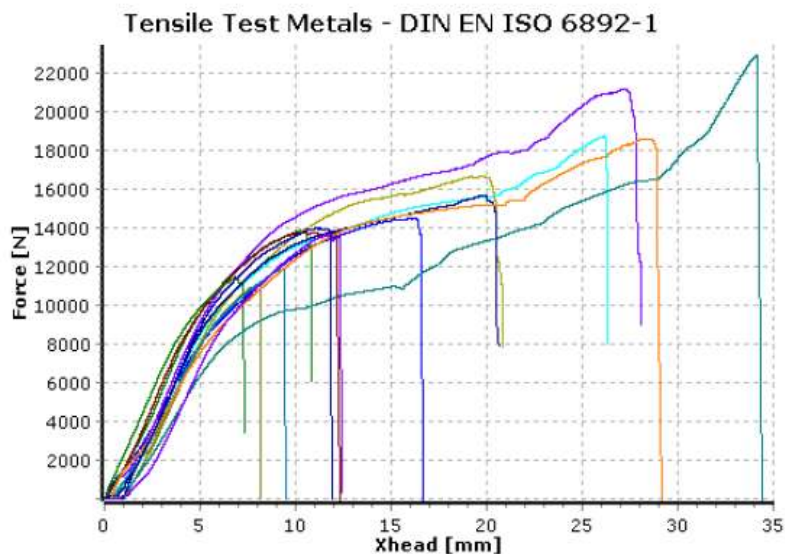


6. ábra

Alform® 700 alapanyag ponthegeztett kötésének mikrosziszlati képei ($t_h=18$ per, $I_h=10,6$ kA, $F_e=1200$ daN)

Az alapanyag felől indulva a szövetszerkezeten bainit mátrixba ágyazott martensit és cementit szigetek figyelhetők meg. Az átlagos szemcseméret 5-10 μm közötti tartományba esik, ami fokozatosan durvul. A varratfémre öntött szerkezetű, dendrites struktúra jellemző. Összességében megállapíthatjuk, hogy a hegesztett kötés mikroszerkezetére a hőbevitelnek jelentős hatása van.

A keresztirányú szakítóvizsgálat során rögzített diagrammok alatti terület integrálásával a törésig elnyelt energia számítására nyílik lehetőség (7. ábra).



7. ábra

A keresztirányú szakítóerő vizsgálata során rögzített erő-elmozdulás diagramok

4.3 Eredmények értékelése

A nyíró-szakító ill. a keresztirányú szakítóvizsgálat eredményeinek összevetése alapján az alábbi megállapításokat fogalmazhatjuk meg.

- 1.) Tekintettel arra, hogy a termomechanikusan kezelt acélok gyártástechnológiájának sajátosságai nem egyensúlyi szövetszerkezetet eredményeznek, ezért ezen acélok hegesztése esetén – a szilárdsági tulajdonságok nemkívánatos csökkenésének elkerülése érdekében – a hőbevitel mértékét korlátozni szükséges. Az elvégzett kísérletek eredményei alapján megállapítottuk, hogy a termomechanikusan kezelt acélokra jellemző komplex (extra finom) szövetszerkezet megőrzése a rövid ideig tartó, intenzív hőbevitel esetén biztosítható, következésképpen a kemény munkarend alkalmazása indokolt. Az elvárásoknak megfelelő hegesztett kötések megvalósítása érdekében a hőbevitel minimalizálására kell törekedni.
- 2.) Mindkét összetett célfüggvény esetén meghatároztuk az optimális hegesztési paramétereket. Megállapítottuk, hogy az optimális technológiai paraméterek közel azonosak, a nyíró-szakító erőre történő optimalálás esetén keményebb munkarend alkalmazása indokolt.
- 3.) Az optimális technológiai paraméterekkel elkészített kötés keresztirányú szakítóvizsgálata során a tönkremenetel – megközelítőleg kétszeres elektród benyomódás (deformáció) mellett – közel 40%-al alacsonyabb erő esetén következik be, mint a nyíró-szakító vizsgálat esetén, ezért a vasúti járműszerkezetek tervezése során a nyíró-szakító erő minimális értékére (STS_{min} [kN]) vonatkozó követelmény figyelembevétele javasolt.
- 4.) Az elvégzett kísérletsorozat eredményei alapján meghatározott optimális technológiai paraméterek alkalmazása esetén a nyíró-szakító erő értéke több mint 22%-al haladja meg az AWS D8.1M ajánlás által meghatározott minimális értéket (kisebb, mint 5%-os elektród benyomódás mellett).

5. Összefoglalás

Jelen publikációban a vasúti járműszerkezet gyártásban alkalmazott Alform® 700 M típusú termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélból készült ellenállás-ponthegesztett kötések nyíró-szakító és keresztirányú szakító vizsgálatának eredményeit ismertettük. Elsődleges célként az optimális ellenállás-ponthegesztési technológia kidolgozásához kapcsolódó vizsgálatok végrehajtását tűztük ki célul. Elvárás, hogy a meghatározott technológiai paraméterekkel elkészített hegesztett kötés teherbírása a lehető legjobban közelítse meg a kiinduló alapanyag teherbírását, ugyanakkor elégítse ki a vasúti járműszerkezetekre vonatkozó követelményeket.

Megállapítottuk, hogy az alapanyag nem-egyensúlyi szövetszerkezete nagyfokú gyártási fegyelmet igényel, ami költségnövelő tényező a gyártás során. Megállapítottuk, hogy a termomechanikusan kezelt acélokra jellemző komplex (extra finom) szövetszerkezet kilágyulása rövid ideig tartó, intenzív hőbevitel esetén (kemény munkarend alkalmazásával) kerülhető el. Az elvárásoknak megfelelő hegesztett kötések megvalósítása érdekében a hőbevitel minimalizálására kell törekedni.

Mindezek figyelembevételével indokolt a további kutatások (pl.: fraktográfiai vizsgálatok, keménységeloszlás meghatározása (HV0,2 az MSZ EN ISO 6507-1:2018 szabvány alapján), a törésig elnyelt energia számítása és összevetése, stb...) végrehajtása az eredmények alátámasztása érdekében.

Irodalomjegyzék

- [1] Borhy I.: Termomechanikusan hengerelt nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztésének lehetőségei a vasúti járműszerkezet gyártásban, Proc. of 29. Nemzetközi Hegesztési Konferencia (Miskolc, 2018. május 24.-26.), Török I. ed., (ISBN 978-963-358-160-5), 2018, pp. 169.-180;
- [2] Borhy I., Tóth T.: Termomechanikusan hengerelt nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztési technológiájának optimalizálása, Hegesztéstechnika (ISSN 1215-8372), XXIX. évf. 4. szám, 2018, pp. 43-46;
- [3] MSZ EN 15085-3:2007, Vasúti alkalmazások. Vasúti járművek és részegységeik hegesztése. 3. rész: Tervezési követelmények, 2007;
- [4] AWS D8.1M:2013, Specification for Automotive Weld Quality – Resistance Spot Welding of Steel, American Welding Society, 2013;
- [5] Varbai B., Sommer C., Szabó M., Tóth T., Májlínger K.: Shear tension strength of resistant spot welded ultra high strength steels, Thin-Walled Structures, 142 (2019), pp. 64.-73. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.051>);
- [6] Box G. E., Wilson K. G., On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. Journal of the Royal Statistical Society, 1951. 13: pp. 1-41;
- [7] MSZ EN ISO 17677-1:2019, Ellenállás-hegesztés. Szakszótár. 1. rész: Ellenálláspont-, ellenállásdudor- és ellenállásvonal-hegesztés, 2019;
- [8] MSZ EN ISO 14273:2016, Ellenállás-hegesztés. Hegesztett kötések roncsolásos vizsgálata. Ellenállás-ponthegesztéssel és zömítő ellenállás-dudorhegesztéssel készített varratok ütve-nyíró vizsgálata és a próbatest méretei, 2016;
- [9] MSZ EN ISO 14272:2016, Ellenállás-hegesztés. Hegesztett kötések roncsolásos vizsgálata. Ellenállás-ponthegesztéssel és zömítő ellenállás-dudorhegesztéssel készített varratok keresztirányú szakítóvizsgálata és a próbatest méretei, 2016;
- [10] MSZ EN ISO 14272:2017, Ellenállás-hegesztés. Pont-, dudor- és vonalhegesztett varratok Vickers-keménységének (kis terhelésű és mikrokeménység-) vizsgálatai, 2017;

LYUKKORRÓZIÓ LÉZERSUGARASON HEGESZTETT KORRÓZIÓÁLLÓ ACÉLOKNÁL

PITTING CORROSION AT LASER WELDED CORROSION RESISTANT STEELS

Fábián Enikő Réka

Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 1081,
Budapest, Népszínház utca 8.

fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Lézersugaras hegesztéskor a hegesztési sebesség növelésével egyre keskenyebb varratot hozunk létre., és kicsi lesz a hőhatás övezet is, ahol nem jellemző a szemcsedurvulás. Duplex acéloknál a varratok ferrittartalma jelentősen megnő. Az ASTM G48 szerinti lyukkorróziós tesztelés azt mutatta, hogy a 304 jelű ausztenites acéloknál a lyukkorrózió nem koncentrálódott a varrat környezetére, míg a duplex acéloknál a lyukkorrózió elsősorban a varrat környezetében jelent meg, ahol jellemzően megnőtt a ferrit tartalom. A varratok ausztenit tartalmát hozaganyagokkal módosítottuk Amennyiben a varratfém inhomogén a korrózió mértéke erőteljesebb. Legkisebb korróziós sebességet nagy PREN indexű acéloknál kaptunk huzal adagolással a lehető legnagyobb sebességgel végzett hegesztéskor

During to laser beam welding, an increasingly narrower seam is created by increasing the welding speed, and the heat-affected zone will also be small, where grain roughness is not typical. In duplex steels, the ferrite content of the welds increases significantly. Corrosion testing according to ASTM G48 showed that for austenitic steels 304, pitting corrosion was not concentrated in the weld environment, while for duplex steels, pitting corrosion appeared in weld metal and heat affected zone in case of autogenously welding, where the ferrite content increased. The austenite content of the welds was modified with fillers. If the weld metal is inhomogeneous, the degree of corrosion is stronger. The lowest corrosion rate was obtained for steels with high PREN index by welding with wire at the highest possible speed

1. Bevezetés

A vas alapú ötvözetek korrózióval szembeni ellenállást passzíváló ötvözőkkel lehet elérni. A korrózióálló acélok két legfontosabb passzíváló ötvözője a Cr és Ni. A korrózióálló acélok nevét adó tulajdonságának, alapvető feltétele a Cr ötvöző tartalma, melynek legalább 11-13 % - ot el kell érnie, a korrózióállóság biztosításához. A szükséges Cr tartalom révén a felületen, néhány rácsparaméternyi (50 -10 nm vastag) vékony oxid réteg jön létre (Cr_2O_3), mely megvédi az acélt a korróziótól. Ezt a réteget passzív rétegnek, a folyamatot passzíválódásnak nevezzük.

A korrózióálló acélokat szövetszerkezetük alapján korábban három csoportba sorolták: ferrites, martenzites és ausztenites korrózióálló acélok, napjainkban ezeket kibővíti a duplex acélok.

A duplex acélok nevüket a kettős, ferrit- ausztenites szövetszerkezetről kapták, melynek köszönhetően nagy folyáshatárhoz jó korrózióállóság társul. Azonos rezisztenciahatárú duplex acélok szilárdsága, folyáshatára sokkal nagyobbak, mint az ausztenites acéloké, ezért igen sok területen használják a duplex acélokat [1-3]. A hasonló teherbírású tartály gyártásához duplex acélok jelentős tömeg megtakarítást jelentenek az ausztenites acélokhöz képest a nagyobb folyáshatárnak köszönhetően [4]. A kisebb nikkel tartalom az árkülönbséget tovább növeli. A nikkel árának világpiaci ingadozása [5] szintén a duplex acélok gyártási mennyiségének növekedése felé viszi a termelést. A duplex acélok a mai modern kohászati technológiákkal, nagy biztonsággal és előre tervezhető mechanikai- és korróziós tulajdonságokkal gyárthatók.

A tengervíz felszíni hatásának kitett fémek és ötvözetek korróziós vizsgálatával és ezek értékelésével az MSZ EN ISO 11306, a korróziós fáradás vizsgálatáról az ISO 11782 szabvány rendelkezik. A pitting korróziós értékelését az ISO 11463 tartalmazza. A korrózióálló acélokat szokták csoportosítani lyukkorrózióállósági egyenértékük szerint. A lyukkorrózió-állósági egyenérték (pitting resistance equivalent = pre) a vegyi összetételtől jelentősen függ. Számítási módja:

$$\text{PRE} = \text{CR} + 3.3 (\text{MO} + 0.5\text{W}) + 16\text{N} \quad (1)$$

Néhány napjainkban legtöbbet használt jellegzetes duplex és ausztenites acél lyukkorrózió-állósági egyenértékét a 1. Táblázatban láthatjuk

	Duplex acél					Ausztenites acél			
Acélminőség	1.4162	1.4362	1.4662	1.4462	1.4410	1.4307	1.4404	1.4539	1.4539
Gyártó jel OUTOKUMPU	LDX2101	2304	LDX2404	2205	2507	4307	4404	904L	254SMO
PRE	26	28	33	35	43	18	24	34	43

1. Táblázat. Néhány gyakran használt, OUTOKUMPU cégnél gyártott duplex és ausztenites acél lyukkorrozio-állósági egyenértéke [3]

A különböző termékek gyártása során azonban igen sokszor van szükség hegesztett kötés kialakítására. A megömlesztés és a gyors lehűlés jelentős szövetszerkezeti változásokat hozhat létre, ezáltal a varrat és a hőhatásövezet az alapanyagétól jelentősen eltérő mechanikai- és korróziós tulajdonságokkal fog rendelkezni.

Az ausztenites korrózióálló acéloknak viszonylag rossz a hővezető képességük, szénacélokhöz képest nagyobb a hőtágulásuk és nagyobb a villamos ellenállásuk, ezért viszonylag kis hegesztési hőbevitellel kell hegeszteni, koncentrált hőforrásra van szükség, arra kell törekedni, hogy minél keskenyebb hőszórt területet melegítsünk fel a hegesztés során.

A lézersugaras hegesztés, mint alternatíva kézenfekvőnek tűnik a koncentrált hőbevitel és a nagy hegesztési sebesség hatására kialakuló keskeny hőhatásövezet miatt, azonban a rendkívüli hűlési sebesség hatására a szövetszerkezetben az ausztenit- ferrit fázis aránya jelentősen megváltozik.

2. Anyagok és technológiák

Egy alapminőségű ausztenites szövetszerkezetű és négy különböző minőségű duplex acéllemezt lézersugaras hegesztésekor lejátszódó folyamatokat vizsgáltunk. A vizsgálatra kijelölt lemezek vegyi összetétele a 2. táblázatban látható.

VIZSGÁLATI ANYAG		VEGYI ÖSSZETÉTEL, TÖMEG%									
Szabványos jelölés	Gyári név/ vastagság, mm	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu
X3CrMnNiN 21-5-1	LDX 210 / 1,5	0,023	0,66	4,97	0,022	0,001	21,49	1,51	0,29	0,228	0,25
X2CrNiMoN22-5-3	2205 / 1,5	0,019	0,37	1,42	0,022	0,001	22,4	5,8	3,16	0,177	-
X2CrNiN23-4	2304 / 2,5	0,018	0,30	1,37	0,024	0,001	23,16	4,71	0,34	0,12	0,27
X2CrNiMnMoCuN 24-4-3-2	2404 / 3	0,025	0,36	3,00	0,022	0,001	23,92	3,66	1,78	0,279	-
X3CrMnNiN 21-5-1	LDX 2101 / 3	0,022	0,67	4,97	0,022	0,001	21,52	1,57	0,29	0,213	0,32
X5CrNi18-8	304 / 2,5	0,04					18,15	8,31			

2. Táblázat A vizsgálati minták vegyi összetétele

A lézersugaras hegesztést a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-ben végeztük. 2,5- 3 mm-es vastagságú lemezek egyik részénél az autogén hegesztésekhez Triumpf TLF 5000, 5KW-os CO₂ gázlézert, ahol a plazmaképződés fokozása érdekében héliumot alkalmaztunk. A duplex anyagok hegesztésénél kísérleteinket kiegészítettük diódapumpált, Rofin DY 027 típusú NdYAG lézerberendezésen végzett hegesztésekkel. A NdYAG lézerberendezésen lehetőség volt a kialakuló varratfém módosítására hegesztő huzal, illetve por adagolással. Hozaganyagok vegyi összetétele a 3. táblázatban látható. Az alkalmazott eljárások módosítják a varrat alakját [6,7]

Hozaganyag	Névtelen vegyi összetétel						
	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	N	C
Metco 41C por	Fő alkotó	17	12	2,5	2,3	-	0,03
22 9 3 LN / 0,8 mm	Fő alkotó	22,5	8,5	3,0	0,5	0,15	0,02

3. táblázat: A hegesztéshez használt por és huzal kémiai összetétele

A kísérlet során az NdYAG berendezést 2500W-os teljesítményen használtuk. A Sulzer Metco berendezésen maximum 15 g/perces poradagolást sikerült elérni. Huzaladagoláskor 900- 1000 mm/perces huzalsebességnél jött létre megfelelő varrat szemrevételezés alapján. 1,5 mm vastagságú lemezeknél hozaganyaggal (por és huzal) való hegesztés is kivitelezhető volt a lézertolt lemez felületén való fókuszálásával. Ezeknél a lemezeknél 1000 mm/min előtolási sebességgel való huzaladagoláskor is létrejött varrat a teljes keresztmetszetben. A 2,5- 3 mm vastagságú duplex lemezeknél huzaladagolással végzett hegesztéskor a lézernyalábot 4-6 mm-el defokuszálni kellett a lemez felületéhez viszonyítva és a lézersugár haladási sebességet legfeljebb 500 mm/percre kellett állítani megfelelő varrat ki alakulása érdekében. Szemrevételezés alapján 900 mm/min előtolási sebességgel való huzaladagolás bizonyult megfelelőnek.

Védőgázként korona, illetve gyökvédelemre argon védőgázt használtunk.

Korróziós tesztek az ASTM G 48 /B szerint végeztem 6%-os FeCl₃-os oldatban ún áztatásos módszerrel végeztem. A vizsgálandó mintákat a varrat környezetekből munkáltuk ki a szabványban meghatározott metallográfiai mintavételezések melletti pozíciókból.

Úgy az ausztenites, mint a duplex acélok szövetszerkezetének vizsgálatakor nagyon fontos a minta előkészítése. Több lépéses csiszolást követően 3 µm és 1 µm átmérőjű gyémánt szuszpenziós polírozásra is szükség van. Ausztenites acéloknál a polírozási fokozatot szükséges elvinni a 0,05 µm átmérőjű Al₂O₃ -ot tartalmazó szuszpenzió A maratás jellemzően frissen polírozott, lemosott szárított mintákon végezhető el. Metallográfiai vizsgálataink során több marószert is kipróbáltunk. Kalling'2 marószerezrel a fázisokat meg lehetett különböztetni, de azok mennyisége nehezen határozható meg képelemző segítségével a kis kontraszt miatt. Ausztenites acélnál a legszebben a királyvíz hozta ki a szövetszerkezetet. Duplex acéloknál a fázisok megkülönböztetésére a Beraha'2 reagens (85 mL víz, 15 mL HCl, 1 g K₂S₂O₅) bizonyult legmegfelelőbbnek, mivel ez az ausztenitet nem marja, a ferriten sötét, vékony szulfid lerakódás képződik. A fázisarányok megállapításáért nagy felbontású képeket készítettem jellemzően a teljes varratot feltérképezve, majd ezeket elemeztem J Microvision1.27 szoftverrel. A finom kiválások megkülönböztethetősége szükségessé tette a legalább 500x-os nagyítást-

3. Vizsgálati eredmények

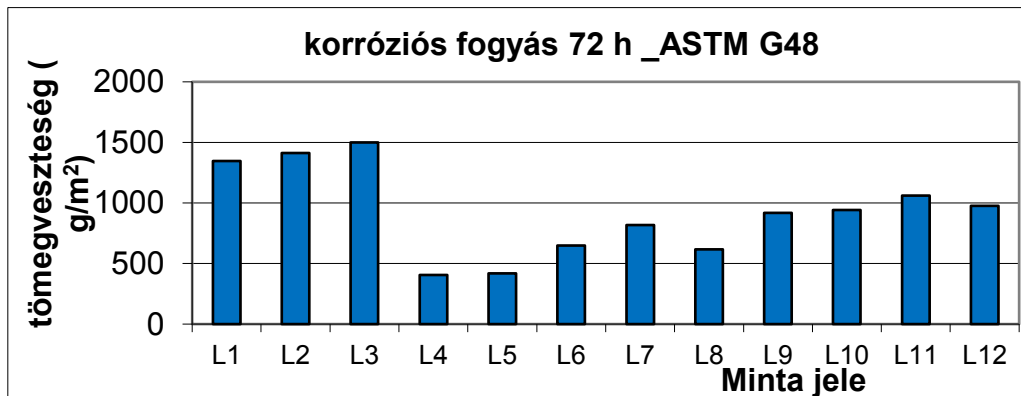
3.1 Autogén hegesztés

Trumpf TLF 5000, 5KW-os Co₂-es gázlérrel 7l/min mennyiségű hélium alkalmazása mellett hegesztettük a 2,5- 3 mm-es vastagságú ausztenites és duplex lemezeket, homogén és heterogén kötéseket hozva létre. A fókuszolt a lemez felületére esett. A hegesztési paramétereket a 4.táblázat szemlélteti.

Minta jele	alapanyag	P[W]	v [mm/s]	f [kHz]
L1	2304	5200	8000	CW
L2	2304	3800	5000	CW
L3	2304	2000	2000	50
L4	2404	5200	6000	CW
L5	2404	3800	7000	CW
L6	2404	2000	3000	50
L7	304	5200	8000	CW
L8	304	3800	5500	CW
L9	304	2000	2500	50
L10	2404-304	5200	7000	CW
L11	2404-304	3800	6250	CW
L12	2404-304	2000	2750	50

4. táblázat: A hegesztéshez használt por és huzal kémiai összetétele (CW folyamatos hullám)

A 6%-os FeCl_3 -os oldatban való 72 órás tesztelés azt mutatta, hogy duplex acéloknál minél nagyobb volt a hegesztési teljesítmény, annál kisebb a korróziós fogyása egységnyi felületre számítva (1. ábra). Ausztenites anyagok, illetve ausztenites anyag duplex anyaggal történt, autogénhegesztés után semmi ilyen jellegű összefüggést nem sikerült megállapítani.



1. ábra. A korróziós tesztelés után megjelenő lyukkorrózió mértéke a különböző minőségű korrózióálló acélok Triumph TLF 5000 típusú berendezéssel történt lézersugaras hegesztése után

Tanulmányozva a minták felületét megállapítást nyert, hogy a duplex anyagoknál a lyukkorrózió főleg a varratfémekben és a varratok mellett keletkeztek (2. ábra), miközben az ausztenites anyagú mintáknál a lemezek teljes felületén is megjelent a korrózió (3. ábra) függetlenül, hogy homogén vagy heterogén kötés alakult ki.



2. ábra. A korróziós tesztelés után megjelenő lyukkorrózió 2000W-on való hegesztett kötések környezetében
a) 2304 acél, b) 2404 acél c) 304 acél

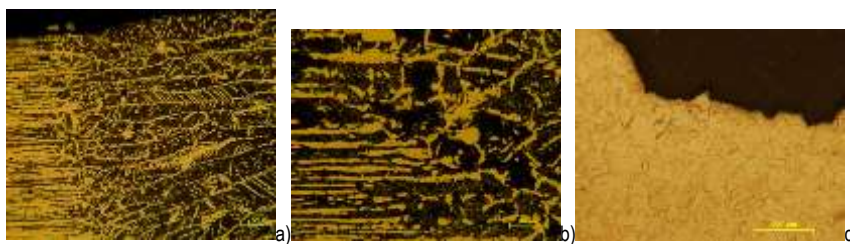


3. ábra Korrózió heterogén kötés 304- 2404 anyagok Különböző teljesítményen hegesztett
a) 5200W b) 3800W c) 2000W

A fénymikroszkópos vizsgálatok azt bizonyították, hogy a duplex acéloknál a varratfém ferrittartalma jelentősen több, mint az alapanyagé volt (4.a, b ábra). Az ausztenites acélnál a királyvizes maratás bizonyította, hogy a lyuk képződés környezetében inhomogenitás nem volt felfedezhető (4.c ábra).

Megfigyelhető, hogy a lézersugár haladási sebességének módosítása nemcsak a varratok szélességét, de a varratok szövetszerkezetét is befolyásolja. A nagyobb sebességgel való hegesztéskor a varratfémekben kialakuló szemcsék nyújtottabbak, mint a kisebb hegesztési sebességnél kialakuló szemcsék. A szemcsehatárokon látható ausztenites

szemcsehatár a kisebb hegesztési sebességnél vastosabb és a szemcsék belsejében jelentősebb mennyiségű diszperz ausztenites fázis különül el, mint nagyobb sebesség alkalmazásakor, ahogy azt Beraha'2 típusú színes marószerrrel kiválóan láthatóvá tehető. A 5. ábra hegesztési sebesség hatását szemlélteti autogén lézersugaras hegesztéskor.

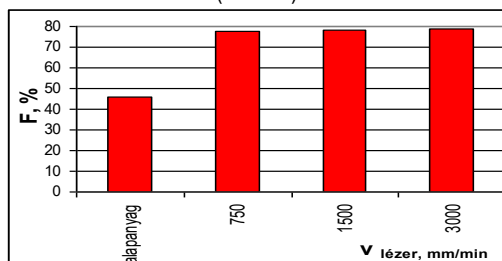


4. ábra Fénymikroszkópos vizsgálati eredmények a tesztelt mintákról
a) 2404 acél lézersugaras hegesztés után Beraha'2 reagens $N_{eredeti}=100\times$ b) 2404 acél hőhatás övezete $N_{eredeti}=500\times$, Beraha'2 reagens c) lyukkorrózió alatti rész az ausztenites acélnál $N_{eredeti}=100\times$. Király víz



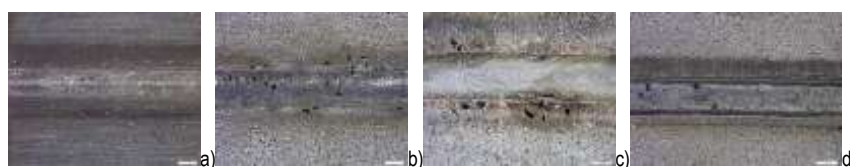
5. ábra A hegesztési sebesség hatása a varrat szövetszerkezetére autogén lézersugaras hegesztéskor.
a) 2101 /1,5 mintánál; Marószér Beraha'2. Eredeti nagyítás: $N=500\times$
a) $v_{lézersugár} = 3000\text{mm/perc}$ b) $v_{lézersugár} = 1500\text{mm/perc}$ c) $v_{lézersugár} = 750\text{mm/perc}$

A varratfémek szövetszerkezetének képelemzős módszeren alapuló fázisanálízise azt mutatta, hogy lézersugaras autogén hegesztéskor varratfém ferrittartalma jelentősen megnő az alapanyaghoz viszonyítva, de a hegesztési sebesség növelésével a varratfém ferrit/ auszénit arány jelentősen nem változik (6. ábra).



6. ábra A hegesztési sebesség hatása a varratfém ferrit tartalmára autogén lézersugaras hegesztésekor az LDX 2101/1,5 mintasorozathál

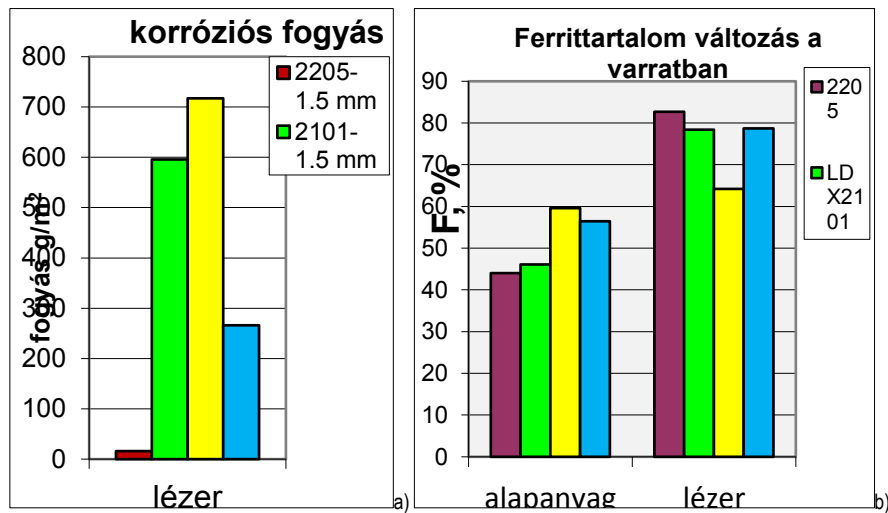
NdYAG lézerberendezéssel 2500W-on hegesztett különböző minőségű duplex minták korróziós tesztelése azt mutatta, hogy a duplex acélokban lyukak a varratoknál és a hőhatás övezetben jelentek meg, de azok mérete és mennyisége az adott acélok PRE indexével mutat összefüggést. A standard 2205 jelű mintánál alig lehetett felfedezni lyukakat még 72 óra után is. Ennél a mintánál az egységnyi felületre vetített fogyás alig haladta meg a 15g/m^2 . A 2404-es mintánál a varraton már nagyobb lyukakat lehetett felfedezni, a 2304 anyagú mintánál a hőhatás övezetben jelentős méretű lyukak keletkeztek. Az LDX 2101jelű mintánál lyukak úgy a varrat felületen, mint a hőhatás övezetben megjelentek (7. ábra).



7. ábra. A korróziós tesztelés után megjelenő lyukkorrózió jelensége a különböző minőségű duplex acélok lézersugarason hegesztett mintáinál.
 $v_{lézer}=1500\text{mm/perc}$

a)2205/1,5 mm minta b) LDX2101/ 1,5mm minta c) 2304/3mm minta d) 2404/3 mm minta

Ahogy a lyukak megjelenésének számszerű mennyisége is, úgy az egységnyi felületre vonatkoztatott fogyás is azt mutatja hogy a korróziós folyamatok főleg az ötvözöttséggel, a PRE indexxel vannak szoros kapcsolatban elsősorban, és nem a kialakult varratok ferrit tartalmával (8. ábra)



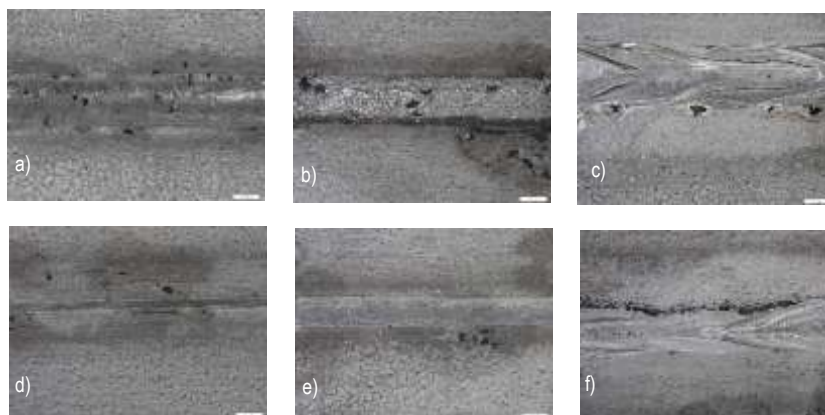
8 ábra. A duplex anyagok autogén lézersugaras hegesztésével összefüggő változások. . $v_{\text{lézer}}=1500\text{mm/perc}$

a) korróziós fogyás ASTM G48 /B teszt után b) ferrittartalom változás

3.2. Hozaganyaggal végzett lézersugaras hegesztés

1,5 mm vastagságú lemezeknél hozaganyaggal (por és huzal) való hegesztés is kivitelezhető volt a lézerfolt lemez felületén való fókuszálásával. Teljes átolvadás 1500 mm/ perces sebességgel minden esetben létrejött a vékony lemezeknél. Ezeknél a lemezeknél 1000 mm/min előtolási sebességgel való huzaladagoláskor is létrejött varrat a teljes keresztmetszetben.

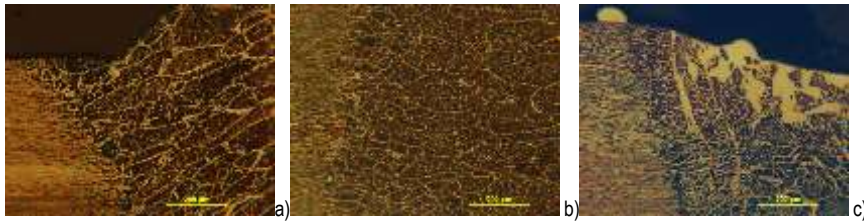
A korróziós tesztelés azt mutatta, hogy a lyukkorrózió a varratok környezetére koncentrált (9. ábra), ami a hőhatásövezetek és a varratok korrózióval szembeni gyengébb ellenállóképességű szövetelemek jelenlétével, és a durvább szemcseszerkezettel magyarázható (10. ábra).



9. ábra. Hozaganyag hatása a lyukkorrózió megjelenésére 2101/1,5 lemezeknél.

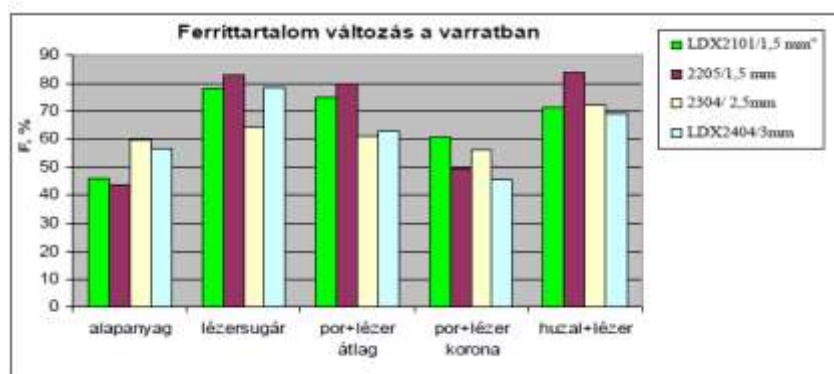
$v_{\text{lézersugár}} = 1500\text{mm/perc}$

a) autogén hegesztés, korona b) poradagolás 14 g/perc korona c) huzal adagolás korona
e) autogén hegesztés, gyök f) poradagolás 14 g/perc gyök g) huzal adagolás gyök

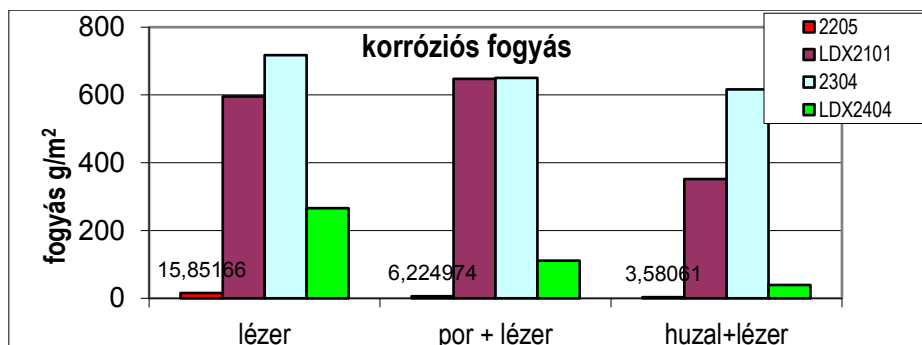


10. ábra. Hozaganyag hatása a varratok környezetének szövetszerkezetére 2205/1,5 lemezeknél. $v_{\text{lézersugár}} = 1500 \text{ mm/perc}$

Annak ellenére, hogy a porszórással végzett hegesztéskor a varratok ausztenit tartalma megnőtt, nem ott lett a legkisebb fogyás korróziós teszteléskor. Ahogy azt a 11. ábrán láthatjuk a poradagolással végzett hegesztéskor a korona részen relatív nagy lyukak keletkeztek (9. b) ábra). A korróziós fogyás az acélok többségénél hozaganyag adagolással csökkenthető volt. Minden esetben legkisebb fogyás a huzaladagolással tapasztaltuk. (12. ábra). A növelt hegesztési sebesség az ausztenites poradagoláskor jelentősebb inhomogenitást hozott a varrat szövetszerkezetében (13. ábra)-

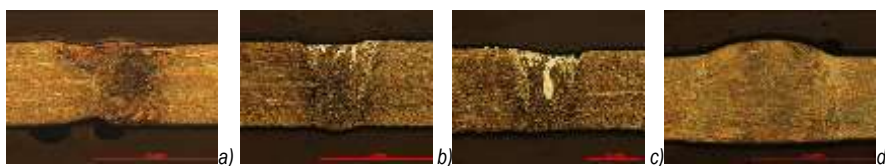


11 ábra. A hozaganyag adagolás hatása duplex anyagok lézersugaras hegesztésekor kialakuló varratfém ferrittartalmára, teljesen átmenő varratoknál



12. ábra. A hozaganyag adagolás hatása duplex anyagok lézersugaras hegesztett minták korróziós fogyására 72 óra után

A 14 g/min mennyiségű por adagoláskor a varratfém az esetek többségében inhomogén lett. Jellemzően a varratok korona részén több lett az ausztenit, mint a varrat többi részén. A hegesztési sebesség növelése a kialakuló varrat inhomogenitását fokozta (13. ábra).



13. ábra. Hozaganyag hatása a varrat alakra 2101/1,5 lemezeknél. Marószerszer: Beraha'2 reagens;
a) autogén hegesztés, $v_{\text{lézersugár}} = 1500 \text{ mm/perc}$ b) poradagolás 14 g/perc $v_{\text{lézersugár}} = 1500 \text{ mm/perc}$ c) poradagolás 14 g/perc $v_{\text{lézersugár}} = 2400 \text{ mm/perc}$ d) huzaladagolás 1000 mm/perc, $v_{\text{lézersugár}} = 1500 \text{ mm/perc}$

4. KÖVETKEZTETÉS

Lézersugaras hegesztéskor a varratok hőhatásövezete nagyon keskeny, ausztenites acéloknál szemcsedurulás nem következik be.

Lézersugaras hegesztéskor a duplex acélok hőhatás övezetében szemcsedurulás következik be, a zóna ferrit tartalma jelentősen megnő.

A lézersugaras hegesztéskor a hegesztési sebesség növelése a korróziós fogyás csökkenését eredményezi.

A korróziós fogyás a duplex acélok többségénél hozaganyag adagolással csökkenthető volt. Minden esetben legkisebb fogyás a huzaladagolással tapasztaltuk.

Irodalomjegyzék

- [1] Gunn, R.N., Duplex stainless steels. Abington Publishing, Cambridge, p: 1-47, 110-143, 1999.
- [2] Properties of the new duplex grade LDX 2404 - Outokumpu;
<http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Properties-of-the-new-duplex-grade-LDX-2404-Acom.pdf>
- [3] Kwang Tae Kim, Yong Heon Lee, Won Qeun Son : Duplex stainless steel having excellent corrosion resistance with low nickel; EP1838890 A1 kiadási számú szabadalmi bejelentés, 2007
- [4] Duplex stainless steel for storage tanks-Brochure;
http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Duplex_for_Storage_Tanks-brochure.pdf.
- [5] Nikkel árváltozása a tőzsdén
http://www.kitcometals.com/charts/nickel_historical_large.html
- [6] Elin M Westin ,Anna Fellman: [Effect of laser and laser hybrid welding on the corrosion performance of a lean duplex stainless steel](#). Journal of Laser Applications 22(4), 150-158 DOI: [10.2351/1.3533146](https://doi.org/10.2351/1.3533146)
- [7] Fábrián, E. R., Dobránszky, J., Csizmazia, J., Ott, R. Effect of laser beam welding on the microstructure of duplex stainless steels Materials Sci-ence Forum. 885, pp. 245–250 2017, doi.org/10.4028

A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK MÉRÉSE ÉS FEJLESZTÉSE

THE MEASURING AND DEVELOPMENT OF THE RELIABILITY OF THE NON-DESTRUCTIVE TESTING

Fücsök Ferenc
MAROVISZ

1191 Budapest, Üllői út 206.

ffucsok@gmail.com

Absztrakt. A roncsolásmentes vizsgálati rendszerek megbízhatósága a módszer belső adottságától, az alkalmazott paraméterek hatásától, és az emberi tényezőtől függ. Egyetértés van abban, hogy a megbízhatóság legfontosabb eleme az emberi tényező, egyben ez a leggyengébb rész.

Az MSZ EN ISO/IEC 17025 szabvány előírásainak megfelelően az akkreditált laboratóriumoknak biztosítani kell a vizsgálati eredmények minőségét. Az eredmények megfigyelésének egyik lehetséges módszere a jártassági vizsgálatokban való részvétel. A MAROVISZ 2009 óta 12 jártassági vizsgálatot szervezett a laboratóriumok részére. A cikk bemutatja a jártassági vizsgálatok értékelési módszereit és eredményeit, különös tekintettel a hegesztések vizsgálatára.

Abstract. The reliability of an NDT system depends on the intrinsic capability of the system, the effect of application parameters, and the effect of human factors. Everybody agreed that the most important component of the reliability is the human factor and it is also the weakest part.

In accordance with EN ISO/IEC 17025 standard the accredited laboratory shall ensure the quality of test results. One of the possible forms of monitoring the results is the participation in proficiency testing programmes. Since 2009 the MAROVISZ has organised 12 proficiency tests for interested laboratories. The paper will present the evaluation methods and the results of proficiency tests, with attention to the tests of welding.

1. Bevezetés

A diagnosztikai vizsgálatok megbízhatósága már évtizedek óta témája úgy a vizsgálatot végzőknek, mint a vizsgálati eredményeket felhasználó orvosoknak vagy mérnököknek. Az 1997 -ben rendezett I. Európai-Amerikai Workshopen, ami a roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatóságával és a módszerek igazolásával foglalkozott, a résztvevők egy gyakorlati képletben állapodtak meg. Ez a modell általánosan írja le, hogy mitől függ egy roncsolásmentes vizsgálati módszer megbízhatósága: [1]

$$M = f(BA) - g(AP) - h(ET) \quad (1)$$

ahol:

M = a roncsolásmentes vizsgálati módszer megbízhatósága,

BA = a módszer belső adottsága,

AP = az alkalmazott paraméterek hatása,

ET = az emberi tényező hatása.

A képletben a f, g, h betűk olyan matematikai függvényeket jelentenek, amelyeket jelenleg nem tudunk pontosan leírni. A belső adottságot (BA) általában a módszer felső határának tekintjük, amit a legkedvezőbb körülmények között, az ideálisnak tekinthető paraméterekkel elvégzett vizsgálat esetén lehet csak elérni. Ezeket a paramétereket egy feladatnál több kísérlettel lehet csak meghatározni, és esetenként nem is határozzuk meg.

Az alkalmazott paraméterek (AP) hatására a vizsgálat érzékenysége és ezzel a megbízhatósága csökken. A gyakorlatban ritkán alkalmazzuk a vizsgálat ideális paramétereit, mert vagy nem ismerjük azokat pontosan, vagy több korlátozó tényező is abba az irányba szorít bennünket, hogy engedményeket tegyünk a vizsgálat minőségének rovására.

A roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatóságának legfontosabb, de egyben leggyorsabban változó összetevője az emberi tényező (ET). Az ember teljesítménye ezen a területen is nagyon sok tényezőtől függ, és gyorsan változhat jó és rossz irányba. Az emberi tevékenység vizsgálata minden esetben nehéz és bonyolult dolog, mivel teljesítménye számos paramétertől függ. Emellett tudja, hogy vizsgálják, ezért viselkedése bizonyos fokig eltér a szokásostól, például később érez fáradtságot. A roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek megbízhatósága minden részletében erősen függ a végrehajtó személyzet munkájának minőségétől.

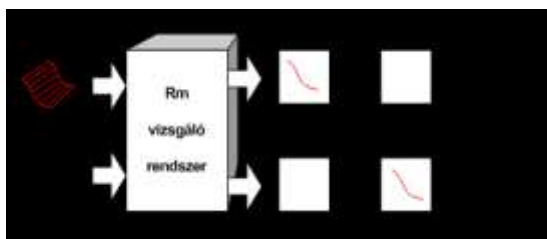
2. A megbízhatóság értékelésének módja

Az emberi értékelés megbízhatóságának számszerű vizsgálatához először a megbízhatóság definícióját kell megismerni. Az elfogadott meghatározás szerint *a roncsolásmentes vizsgálatok értékelésének megbízhatósága annak a foka, ahogy egy vizsgálórendszer képes elérni célját, figyelembe véve a hiány észlelését, jellemzését és a tévedéseket.*

Ebben a definícióban a jellemzés alatt a hiány méretének, helyének, irányának, típusának és közeli szomszédinak meghatározását értjük. Természetesen az a követelmény is fontos, hogy a vizsgált tárgy hibátlan részeit jónak minősítsük, azaz ne legyen az eredmények között téves riasztás.

A jelértékelő rendszerek megbízhatóságát a ROC módszerrel vizsgálják. Az ROC rövidítés jelentése Receiver Operating Characteristic, azaz a vevő működési jellemzője (karakterisztikája). Ezt a módszert az 1960-as években kezdték alkalmazni a radartechnikában, később az emberi érzékelések tanulmányozása és az orvosi diagnózisok területén, valamint a '80-as évektől a roncsolásmentes vizsgálatok értékelésénél is.

Az ROC módszer lényege, hogy valamilyen jel észlelésének valószínűségét a jel eltévesztésének valószínűségével együtt vizsgálja. A módszer részletes ismertetéséhez először nézzük egy roncsolásmentes diagnózist végző rendszer lehetséges eredményeit, ami az 1. ábrán látható.



1. ábra: A roncsolásmentes vizsgálat négy lehetséges eredménye

Rövidítések: PI = Pozitív Igaz indikáció (találat)

NH = Negatív Hamis indikáció

NI = Negatív Igaz indikáció

PH = Pozitív Hamis indikáció (téves riasztás)

Mint az ábra bemutatja, megbízhatósági szempontból négyféle eredménye lehet egy roncsolásmentes vizsgálatnak. Ha egy vizsgált részben, nevezzük cellának, folyamatossági hiány van, azt vagy megtalálja a rendszer vagy nem. A hibátlan cellát pedig lehet helyesen hibátlanak mondani, és rossz minősítéssel hibát tartalmazónak vélni.

Az értékelés lehetséges eredményei az irodalomban szokásos elnevezésekkel:

- **Pozitív Igaz (PI):** hiányt mutattak ki ott, ahol a valóságban volt hiány.
- **Negatív Hamis (NH):** nem mutattak ki hiányt ott, ahol a valóságban volt hiány.
- **Negatív Igaz (NI):** nem mutattak ki hiányt ott, ahol a valóságban nem volt hiány.
- **Pozitív Hamis (PH):** hiányt mutattak ki ott, ahol a valóságban nem volt hiány.

Természetesen a pozitív igaznak és a negatív hamisnak minősített cellák összegének el kell érni az összes hiányt tartalmazó cella számát, jelöljük N1-el.

$$PI + NH = N1$$

Ugyanígy a pozitív hamisnak és negatív igaznak jelölt cellák összegének azonosnak kell lenni az összes jó cella számával, jelöljük N2-vel.

$$PH + NI = N2$$

Az észlelés valószínűségét (POD) a következő módon számítjuk:

$$POD = \frac{PI}{N1} = \frac{PI}{PI+NH} \quad (2)$$

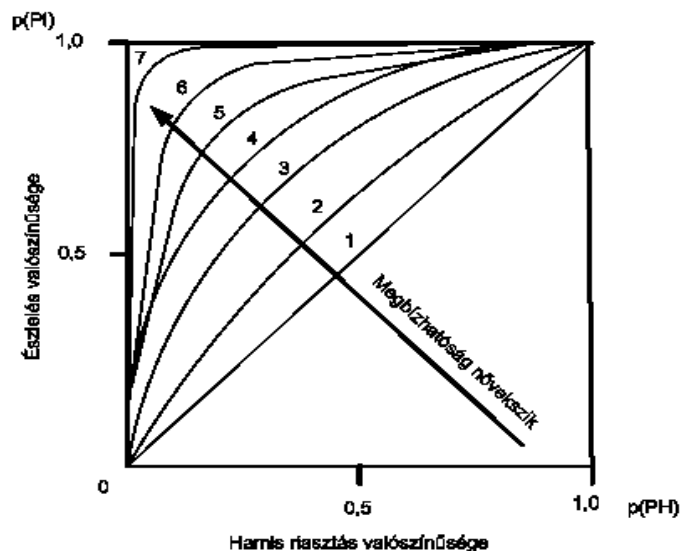
A képletben az észlelés valószínűsége egyenlő a pozitív igaznak (megtalált hiány) minősített cellák és az összes hiányt tartalmazó cella számának arányával.

Ha a vizsgáló ott is hiányt észlelt, ahol a valóságban nincs, akkor hamis riasztást (False Alarm = FA) végez. A hamis riasztás valószínűségének (PFA) számítása:

$$PFA = \frac{PH}{N2} = \frac{PH}{PH+NI} \quad (3)$$

E szerint a képlet szerint a hamis riasztás valószínűsége egyenlő a pozitív hamisnak (hiányt tartalmazónak vélt, de jó) minősített cellák és az összes jó cella számának arányával. Egy mérési eredmény kiértékelése esetén tehát két valószínűségi adatot számítunk ki, melyeket egy koordináta rendszerben ábrázolunk, ez lesz az ROC diagram.

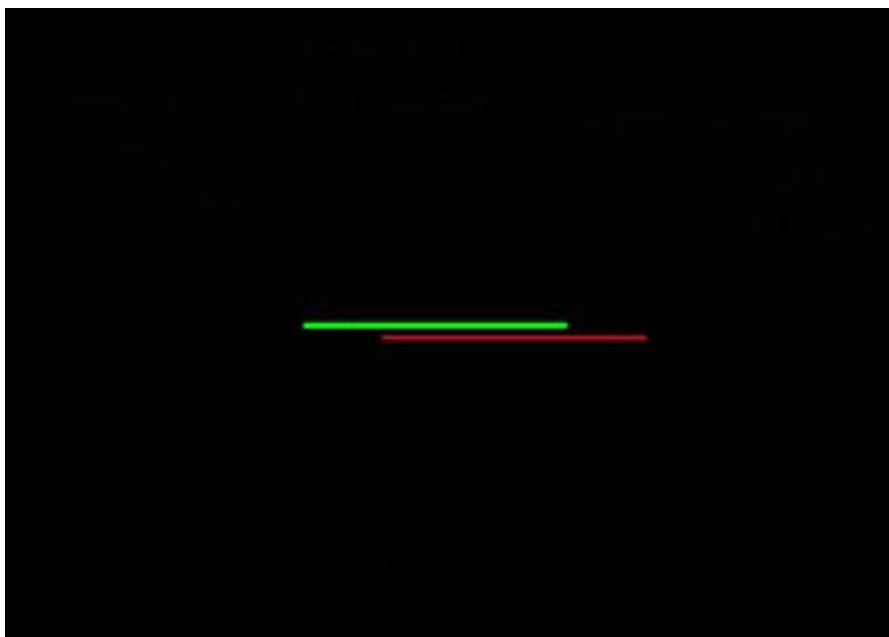
Több méréssel és matematikai módszerekkel meg lehet határozni a teljes görbét, és meg lehet jósolni a rendszer általános teljesítményét. Előre lehet látni, mi történik, ha növeljük az érzékenységet: több hibát találunk-e vagy csak a hamis riasztások száma növekszik. Ha különböző rendszereket vagy rendszer modulokat akarunk összehasonlítani, hogy melyik megbízhatósága jobb, akkor a jellemző ROC görbéket kell összehasonlítani. Könnyen belátható, hogy a meredekebb görbék jobbak, mert azonos értékű detektálási valószínűséghez kisebb hamis riasztási valószínűség tartozik. A 2. ábrán 1 – 7 -tel jelzett görbék növekvő megbízhatóságot mutatnak.



2. ábra: Különböző vizsgáló rendszerek összehasonlítása

Az ábrán 1 -el jelölt átló a találgatást jelképezi, mert például 0,5 értékű hiány észlelési valószínűséghez ugyanilyen arányú hamis riasztás tartozik. Az ideális rendszert az ábra bal felső sarkán átmenő egyenessel jellemezhetnénk, mivel az összes kimutatott hibához nem kapcsolna egyetlen hamis riasztást sem. Fentiek alapján a görbék távolsága a 45°-os, 1 jelű egyenestől jellemzi a rendszer vagy az értékelő személy megbízhatóságát. Ha egy görbe messzebb van az átlótól, akkor a görbe által jellemzett rendszer megbízhatósága jobb.

2.1 Példa az észlelés értékelésére hegesztési varrat vizsgálatánál



3. ábra: Egy hegesztési varrat vizsgálatának értékelése

A 3. ábrán egy hegesztést vázoltunk, amely 22 cellából áll. A hegesztésben egy 7 cella hosszú folytonossági hiány van (vastag, zöld vonallal ábrázolva), aminek a helyét az értékelő hibásan detektálta (vékony, piros vonal).

Az értékelt cellák jelölései az ábrán olvashatók:

N1 = 7 db

PI = 5 db

N2 = 15 db

PH = 2 db

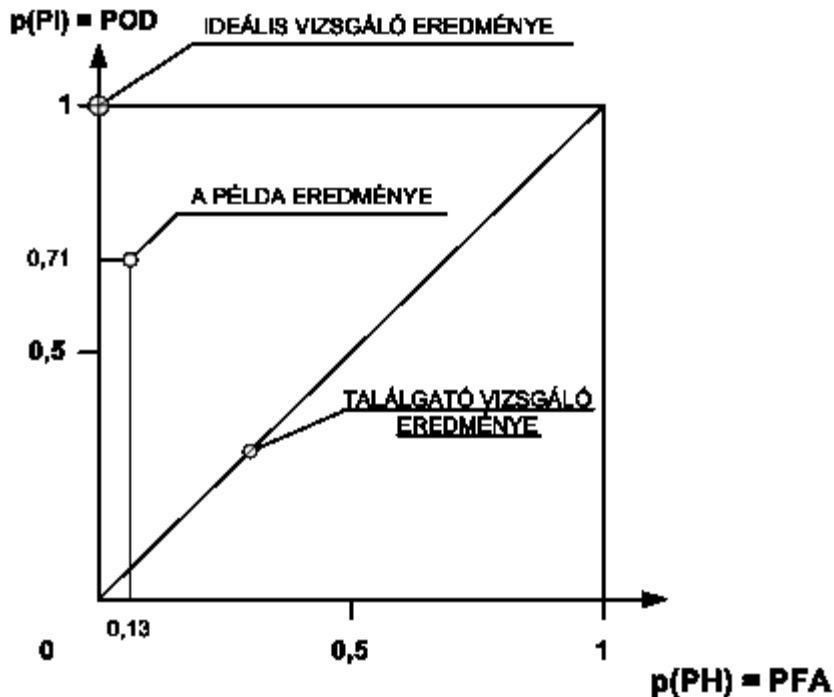
Az észlelés vagy másképpen a pozitív igaz esemény valószínűsége a (2) képlet szerint:

$$POD = p(PI) = \frac{PI}{N1} = \frac{5}{7} = 0,71$$

A hibás riasztás, vagyis a pozitív hamis esemény valószínűsége a (3) képlet szerint:

$$PFA = p(PH) = \frac{PH}{N2} = \frac{2}{15} = 0,13$$

Az eredményeket a 4. ábrán ábrázoltuk, ahol az ideális, és a csak találgató vizsgáló adatait is feltüntettük.

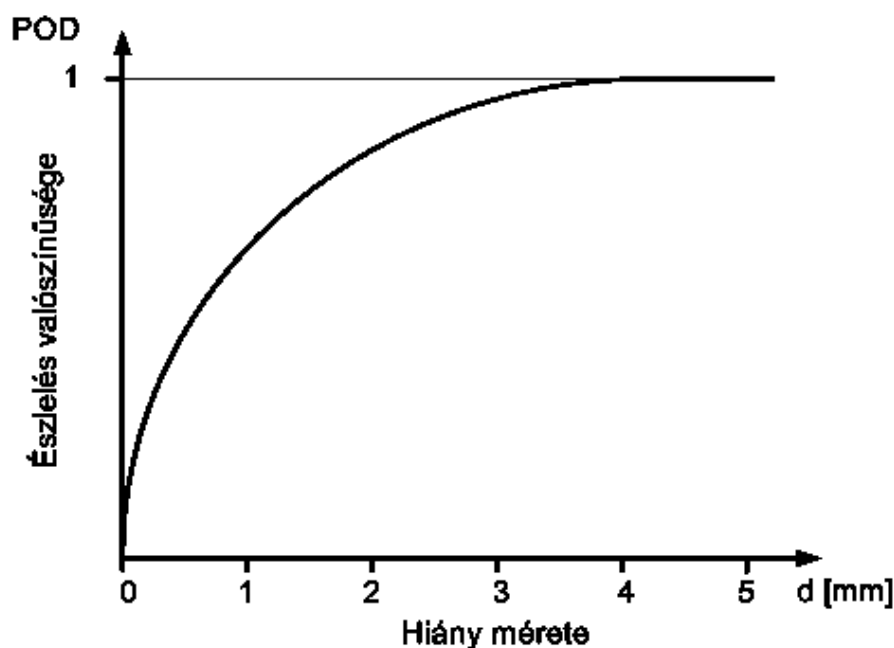


4. ábra: A hegesztési példa eredményeinek ábrázolása ROC diagramban

2.2 A POD görbe

Az egyéni teljesítmények jellemzésére az észlelés valószínűségének görbáját (probability of detection = POD) is használhatjuk. A POD görbe a rendszer vagy az egyén észlelésének valószínűségét mutatja be a hiány méretének függvényében, mint az 5. ábrán látható.

A POD görbét úgy lehet meghatározni, hogy a vizsgált módszerrel különböző méretű hiányokat keresünk, és az összes ismert hiányhoz viszonyítva ábrázoljuk az észlelés arányát. Természetesen lesz olyan méretű hiány, amiből az összeset megtaláljuk. A POD görbe ennél a méretnél éri el a 1 értéket, az ábra példáján ez 4 mm körül van.



5. ábra. Az észlelés valószínűségének (POD) mérése

3. A megbízhatóság fejlesztése

A laborokban végzett roncsolásmentes vizsgálatok megbízhatóságának fejlesztéséhez sok megoldást lehet alkalmazni. Ezek közül a legfontosabb a leggyengébb láncszem erősítése, a személyzet képességeinek fejlesztése.

Minden akkreditált laboratóriumoknak rendelkezniük kell eljárásokkal a végzett vizsgálatok eredményeinek figyelemmel kísérésére. A feladat teljesítésének egyik módja, ha részt vesznek laboratóriumok közötti összehasonlításban vagy felkészültség vizsgáló programokban. Ezek egyik fajtája a jártassági vizsgálat. A [2] szabvány meghatározása szerint a jártassági vizsgálat a résztvevők teljesítő képességének előre meghatározott követelmények szerinti értékelése, laboratóriumok közti összehasonlítás segítségével. A laboratóriumok közti összehasonlítás azt jelenti, hogy a méréseket vagy észleléseket azonos vagy hasonló próbatesteken kell elvégezni, és az eredmények értékelését két vagy több laboratórium számára, azonos módon kell végrehajtani.

A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetségben (MAROVISZ) 2008 óta szervezünk jártassági vizsgálatokat tagjaink és az érdeklődő laboratóriumok részére. A roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek ellenőrzésére a MAROVISZ vizsgálatain való részvétel megfelelő, mert az értékelések a matematikai statisztika eszközeivel bemutatják a résztvevők sikeres méréseit, és esetleges hibáik kijavítási lehetőségeikre is felhívják a figyelmet. Ezzel az eszközzel jelentősen lehet az esetlegesen rossz megbízhatóságot fejleszteni.

3.1 Az eddigi jártassági vizsgálatokról

Jelenleg a MAROVISZ a 12. - 15. jártassági vizsgálatokat szervezi párhuzamosan, melyeken egy időben lehet részt venni. Az eddigi vizsgálatok jelzése és témája a következő felsorolásban olvasható, ahol a dátumok az összefoglaló jelentések kiadásának keltét mutatják.

- KV1-2009 Ultrahangos vastagságmérés. 2010. március 2.
- KV2-2010 Hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek értékelése. 2011. március 28.
- KV3-2011 Keménységmérés hordozható mérőberendezéssel. 2011. december 9.
- KV4-2011 Akusztikus emissziós jelforrás helymeghatározása. 2012. január 25.
- KV1-2012 Ultrahangos vastagságmérés 2. 2012. június 25.
- JVT05-2012 Hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek értékelése. 2013. február 26.

- JV 06 - 2014 Folyadékbehatolásos vizsgálat értékelése. 2014. július 30.
- JV 07 - 2015 Hegesztési varrat ultrahangos vizsgálata. 2015. szeptember 30.
- JV 08 - 2015 Ultrahangos vastagságmérés korrodált munkadarabokon. 2016. május 18.
- JV 09 - 2017 Keménységmérés hordozható mérőberendezéssel. 2017. október 16.
- JV 10 - 2018 Szemrevételezéses vizsgálat vékony lemezek tompa- és sarokvarratain. 2019. április 16.
- JV 11 - 2019 Hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek értékelése. 2020. május 22.

Mint az a felsorolásból látszik, volt olyan vizsgálat, amit az érdeklődés miatt meg kellett ismételni (ultrahangos vastagságmérés, hegesztési varratokról készült radiográfiai filmek értékelése). Az érdeklődést „táplálták” a NAH (régi nevén NAT) követelményei is, melyek azt írják elő, hogy minden akkreditált laboratóriumnak minden akkreditációs ciklusban (ez most 5 év) legalább egyszer minden működési területén részt kell vennie ilyen jellegű vizsgálaton.

3.2 Az eredmények értékelése

A roncsolásmentes vizsgálatok eredményei két csoportra oszthatók: számszerű (skalár) eredmények és észlelések. A skaláris adatokra jó példa a vastagságmérések eredménye. Az észlelés alatt a folytonossági hiányok megtalálását és azonosítását értjük. Nyilvánvaló, hogy a mérések pontosságát és az észlelés – nem észlelés tényét másképpen kell statisztikailag értékelni.

Mind a számszerű eredmények, mind az észlelések értékelések legelső kérdése, hogy a résztvevők eredményeit mihez hasonlítjuk, mit tekintünk a mérendő mennyiség vagy a hiány **valódi** értékeinek. A metrológia meghatározása szerint a valódi értékek természetüknél fogva meghatározatlanok. Ezért az eredményeket a **kijelölt értékhez** hasonlítjuk. A hivatkozott szabvány [2] meghatározása szerint: a kijelölt érték a jártassági vizsgálat próbatestének tulajdonított sajátos tulajdonság. A kijelölt érték meghatározásához gyakran több mérési eredmény szükséges.

A kijelölt érték meghatározása a vizsgált próbatesttől függ. Ha például a próbatestbe mesterségesen munkálunk reflektorokat, azok adatait a gyártás végén megmérhetjük. Ezek a mérési eredmények lesznek a próbatest sajátos tulajdonságai, azaz a kijelölt értékek. De ha a mérendő mennyiség mechanikus mérőeszközzel nem ellenőrizhető, (például korrodált cső falvastagsága) akkor a kijelölt érték meghatározásához az összes résztvevő mérési eredményét lehet felhasználni. A kijelölt érték lehet:

- Referencia érték (pl. etalon).
- Szakértői laboratóriumban nyert mérési eredményekből képzett érték.
- Más pontosabb módszerrel meghatározott érték.
- Mérőrendszer specifikus konszenzus értéke (pl. a beküldött adatok középértéke).

Az eddig szervezett jártassági vizsgálatok értékelésénél a fenti módszerek mindegyikét használtuk.

Az észlelési eredmények értékelését a cikk elején ismertettük. Mivel az említett szabvány erre nem tartalmaz utasítást, a módszert a MAROVISZ ME 5.3 eljárás 1. mellékletében [4] rögzítettük.

A skalár eredmények értékelésére a [2] szabvány több jelzőszámot javasol. Ezek közül a legegyszerűbb a Z szám, melyet többször alkalmaztunk. Részletes ismertetésére most nem térünk ki, az érdeklődők bármely kezdő statisztikai tankönyvben megtalálhatják.

3.3 A jártassági vizsgálatok szervezése

A vizsgálatokat a Szövetség a „Jártassági vizsgálatok” című minőségirányítási eljárásában [4] leírtak szerint rendezi. Ez az eljárás tartalmazza a jártassági vizsgálatok előkészítésének, végrehajtásának és értékelésének követelményeit. A vizsgálatok szervezésének minden más részletével is foglalkozik a minőségirányítási eljárás, ami a MAROVISZ tanúsítása szerint is megfelelően működik.

A vizsgálatok szervezésének minden részlete feltehetőleg nem érdekli a vizsgálatokat megrendelő hegesztőket. Itt csak két fontosabbnak tartott szabályt említünk meg. Az első, amivel már a jelentkezés után találkozunk a résztvevők: a szervezetek azonosításának titkosítása, a másik a dokumentumok készítésének munkamódszere.

Mivel egy laboratórium esetleges kedvezőtlen eredményének nyilvánosságra kerülése piaci hátrányt jelenthet, a Szövetség nagy gondot fordít a résztvevők eredményeinek titkosítására. A résztvevők jelentkezés után kódszámot kapnak, és ezt az információt a szervezők bizalmasan kezelik, és elzárva tartják. A MAROVISZ-ban a napi szervezési munkákhoz szükséges listák nem tartalmazhatják egy lapon a jártassági vizsgálatban résztvevők nevét és kódszámát. Továbbá minden lehetséges alkalommal felhívjuk a laboratóriumok vezetőinek, és a jártassági vizsgálatokban részt vevő munkatársaik figyelmét arra, hogy gondoljanak a kódszámuk és vizsgálati eredményeik bizalmas kezelésére.

A titkos ügykezelés jól működik, az eddig lezajlott vizsgálatoknál sem a laboratóriumokból sem a Szövetségből nem került nyilvánosságra a kódszámokhoz tartozó résztvevő neve. Az összefoglaló jelentésekben az eredményeket csak a kódszámmal azonosítjuk. Így minden résztvevő csak a saját eredményét választhatja ki a táblázatokból vagy diagramokból.

A jártassági vizsgálatok előkészítését és a résztvevők tevékenységének értékelését, a minőségirányítási eljárásában leírtak szerint, a Koordinátor végzi. Az általa írt dokumentumokat a nyilvánosságra hozatal előtt a Szakértői Csoport véleményezi. A kész dokumentumok, például az Összefoglaló Jelentés, csak konszenzus után kerül az Elnökség elé, akik a végleges döntést hozzák a nyilvánosságra hozatalról.

4. Összefoglalás

A roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek elfogadása a megrendelők bizalmán és a laboratóriumok vizsgálóinak megbízhatóságán alapul. A megbízhatóságot a matematikai statisztika módszereivel mérni és fejleszteni lehet. A jártassági vizsgálatok értékelésnél alkalmazott módszerek és ezek eredményei a megrendelők számára bizonyítékot adnak az elvégzett vizsgálatok jó minőségére.

Ha egy laboratórium jól használja a jártassági vizsgálatok eredményeit, akkor hatékonyan tudja ellenőrizni és fejleszteni vizsgálói tudását, valamint megalapozottan jelölheti ki minőségirányítási fejlesztéseinek területeit. A megrendelőknek csak a jártassági vizsgálatokon való eredményes részvételt kell a laboratóriumokon számon kérni.

Irodalomjegyzék

[1] Christina Nockemann, Chris Fortunko: Conclusion of the Workshop European-American Workshop Determination of Reliability and Validation Methods of NDE.

June 18-20, 1997. Berlin, Germany, Proceedings

[2] MSZ EN ISO/IEC 17043:2010 Megfelelőségértékelés. Jártassági vizsgálatok általános követelményei

[3] ISO /IEC Guide 43-1:1997 Proficiency testing by interlaboratory comparisons – Part 1: Development and operation of proficiency testing schemes

[4] MAROVISZ ME 5.3 Jártassági vizsgálatok minőségirányítási eljárásleírás 4. kiadás.
2017. július 12.

ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉS AZ ELEKTRONSUGARAS ÉS A HUZALELEKTRÓDÁS VÉDŐGÁZOS ÍVHEGESZTÉS ALKALMAZÁSÁRÓL NEMESÍTETT NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKNÁL

COMPARATIVE STUDY ABOUT THE ELECTRON BEAM AND GAS METAL ARC WELDING OF QUENCHED AND TEMPERED HIGH STRENGTH STEELS

Dr. Gáspár Marcell

Anyagszerkezet-tani és
Anyagtechnológiai Intézet,
Miskolci Egyetem, 3515
Miskolc-Egyetemváros
gasparm@uni-miskolc.hu

**Sisodia
Raghawendra**

Anyagszerkezet-tani és
Anyagtechnológiai
Intézet, Miskolci
Egyetem, 3515
Miskolc-Egyetemváros
metraghu@uni-
miskolc.hu

Timcsák István

IGM Robotrendszerek Kft.,
9027 Győr, Csörgőfa sor 1.
szerző e-mail
istvan.timcsak@igm-
group.com

Absztrakt – Az elektronsugaras hegesztés új lehetőségeket teremt a nagyszilárdságú szerkezeti acélok jobb kötéstulajdonságokat eredményező és hatékonyabb hegesztésére. Az eljárás kimagasló minőségű varratokat eredményez meglehetősen széles lemezvastagság tartományban. A hagyományos ívhegesztő eljárásokhoz képest jelentősen nagyobb energiasűrűsége révén kisebb hőbevitelt, nagyobb hegesztési sebességet eredményez, amely a hőhatásövezet méretének csökkenéséhez és kisebb hegesztési maradó alakváltozáshoz vezet. A kisebb hőhatásövezetnek köszönhetően a mechanikai tulajdonságok romlása szempontjából kritikus hőhatásövezeti sávok mérete is csökken, amely nagyszilárdságú acélok hegesztésekor kimondottan előnyösnek bizonyul. Ugyanakkor a nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélokra jellemző viszonylag nagy karbonegyenérték miatt a technológiára jellemző intenzívebb hűtési viszonyok a hőhatásövezetben keménységnövekedéshez, ezáltal pedig fokozottabb hidegrepedési veszélyhez vezethetnek. A hegesztési kísérletek során vizsgált alapanyag az MSZ EN 10025-6 szabvány szerinti S960QL anyagminőségű 15 mm lemezvastagságú nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acél volt. Az acéllemezeket PA pozícióban hegesztettük össze a huzalelektródás védőgázos ívhegesztés során V varratalakkal, 9 sorban; az elektronsugaras hegesztés esetén pedig I varratalakkal, beolvadó alátétlemezsel, hozaganyag nélkül, egy sorban. Az alkalmazott huzalelektróda az alapanyagával közel azonos varratszilárdságot eredményező Union X96 volt. A hegesztett kötések tulajdonságait makrovizsgálattal, keménységvizsgálattal, szakítóvizsgálattal és műszerezett ütővizsgálattal elemeztük.

Kulcsszavak: elektronsugaras hegesztés, huzalelektródás védőgázos ívhegesztés, nemesített nagyszilárdságú acél, mechanikai tulajdonságok, hőhatásövezet

Abstract (in English) – The electron beam welding (EBW) sets new possibilities for the effective welding of high strength structural steels with better joint properties. The technology ensures high-quality welded joints in a wider plate thickness range of structural steels. It has a high energy density in comparison to the conventional arc welding processes (e.g. GMAW). As a result of less overall energy input and higher velocity, the effect of welding on the base material in the heat-affected zone (HAZ) and the distortion is much smaller compared to conventional arc welding processes. The low heat input result in a small HAZ and a reduced extension of critical HAZ areas which can be favourable in high strength steels when the mechanical properties can drastically decrease in the HAZ. However, due to the relatively high carbon equivalents of quenched and tempered steels, the intensive cooling during welding may cause critical hardness peaks in HAZ indicating higher cold cracking sensitivity. The examined material was S960QL quenched and tempered structural steel according to EN 10025-6 with 15 mm plate thickness. The plates were welded in PA position. In case of GMAW V-shape butt welds were made in 9 weld passes, whilst one-pass I-shape weld was prepared during EBW without the application of filler metal. The applied wire electrode was the nearly matching type UNION X96. The properties of the welded joints were examined by macroscopic test, hardness test, tensile test and instrumented Charpy V-notch impact tests.

Keywords: Electron Beam Welding (EBW), Gas Metal Arc Welding (GMAW), Quenched and Tempered (Q+HTT) High Strength Steels (HSS), mechanical properties, heat-affected zone

1. Bevezetés

A nagyszilárdságú szerkezeti acélokat kimagasló szilárdsági és szívóssági tulajdonságaik miatt széles körben alkalmazzák a nagy terhelésnek kitett mozgó szerkezetekben (például mobil autódarukban, földmunkagépekben, tehergépkocsikban). A hőhatásövezetben bekövetkező szívósságcsökkenés, esetenként kilágyulás miatt a fajlagos hőbevitel és a rétegközi hőmérséklet korlátozására van szükség, továbbá a fokozott hidegrepedési hajlamból adódóan általában előmelegítés szükséges [1-5]. A hegesztéstechnológiai paraméterek körültekintő megválasztása mellett a hozaganyag kérdéskör is felértékelődik a vizsgált acélcsoportnál [4]. Korábbi hőhatásövezeti szimulációs vizsgálataink során igazoltuk, hogy az S960QL szilárdsági kategóriájú acél hegesztésekor a $t_{8/5}$ hűlési idő a 2,5-30 s intervallumban érdemben nem befolyásolja az egyes hőhatásövezeti sávok szívósságát, a hűlési idő hatása elsősorban a hőhatásövezet méretének kialakulásában nyilvánul meg [3]. Az előzőekből adódóan a keskeny varratot és hőhatásövezetet eredményező elektronsugaras hegesztés ígéretes megoldás lehet a nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez. A technológia létjogosultságát igazolja, hogy a [6] cikkben nagyszilárdságú acélokon végzett elektronsugaras hegesztési kísérletek során az alapanyaggal megegyező szilárdságú varratot érték el, hozaganyag alkalmazása nélkül.

2. Kísérleti körülmények

2.1 Alapanyag és hozaganyag tulajdonságai

A kísérletek során az MSZ EN 10025-6 szabvány szerinti S960QL jelölésű, az SSAB által gyártott Weldox 960 márkajelzésű, 300 × 150 × 15 mm lemezek tompahegesztését végeztük el. A kedvezőbb varratulajdonságok elérése érdekében ugyanebből az anyagminőségből alátétlemezt alkalmaztunk 300 × 50 × 15 mm méretben gyökmegtámasztás céljából. Az alapanyag, valamint a fűzéshez és a referenciaként szolgáló huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéshez használt 1,2 mm átmérőjű, az MSZ EN ISO 16834-A szabvány szerinti G 89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo jelölésű „matching típusú” Union X96 huzalelektroda vegyi összetételét az 1. táblázat, mechanikai tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A kísérletek során alkalmazott alapanyag és hozaganyag vegyi összetétele tömegszázalékban (%)

Anyag	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
S960QL	0,17	0,23	1,23	0,011	0,001	0,20	0,04	0,588
UnionX96	0,11	0,76	1,90	0,015	0,011	0,35	2,23	0,570
Anyag	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	CEV
S960QL	0,041	0,004	0,01	0,061	0,017	0,001	0,002	0,55
UnionX96	0,004	0,057	0,002	0,002	-	-	-	0,76

2. táblázat A kísérletek során alkalmazott alapanyag és hozaganyag mechanikai tulajdonságai

Anyag	R _{p0.2} , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %	KV, J (-40 °C)
S960QL	1014	1053	14	75
UnionX96	930	980	14	40

2.2 Hegesztési paraméterek

Előzetes hegesztési kísérletek alapján sikerült meghatározni a teljes átolvadást eredményező optimális elektronsugaras hegesztési paramétereket, amelyek a 3. táblázatban szerepelnek. A munkatávolság 500 mm volt. A hegesztést egy rétegben, előmelegítés nélkül végeztük el az 1. ábrán látható készülékben egy EBOCAM EK74C – EG150-30BJ típusú elektronsugaras berendezéssel teljes vákuum alkalmazása (2×10^{-4} mbar) mellett. A hegesztést követően a munkadarabot néhány percen keresztül hagytuk lehűlni a vákuumkamrában az oxidáció elkerülése érdekében.

3. táblázat Hegesztési paraméterek elektronsugaras hegesztésnél

U_{gy} , kV	I_s , mA	v_h , mm/s	d_s , mm	I_f , mA
150	49	10	0.4	2067

A referenciaként ugyanazon anyagminőségen és lemezvastagságon elvégzett huzalelektrodás védőgázos ívhegesztési kísérlet során az MSZ EN ISO 14175 szabványnak megfelelő M21 típusú kevert védőgázt alkalmaztuk (82% Ar + 18 CO₂). Egyoldali tompakötést készítettünk 60°-os „V” leélezéssel. A kísérlet során alkalmazott paramétereket a 4. táblázat tartalmazza. A táblázatban szereplő technológia alapvetően kis fajlagos hőbevitelt eredményező paramétereket tartalmaz, ebből adódóan a $t_{8/5}$ hűlési idő az optimális 5-10 s tartomány alsó határához van közel.

4. táblázat Hegesztési paraméterek huzalelektrodás védőgázos ívhegesztésnél

Sor	$T_{elő/rétegekőzi}$, °C	v_h , mm/s	I , A	U , V	E_v , J/mm	$t_{8/5}$, s
root	190	3	117	18.5	600	5.5
2	150	7	247	24.6	700	6
3-9	150	9	285	27.8	700	5



1. ábra

A próbadarab befogása

3. Anyagvizsgálati eredmények

A hegesztett kötések tulajdonságait makrovizsgálattal, keménységvizsgálattal, szakítóvizsgálattal és műszerezett ütővizsgálattal elemeztük. A hagyományos huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés és az elektronsugaras hegesztés jelen kísérleti körülményekre vonatkozó technológiai sajátosságait az 5. táblázatban foglaltuk össze.

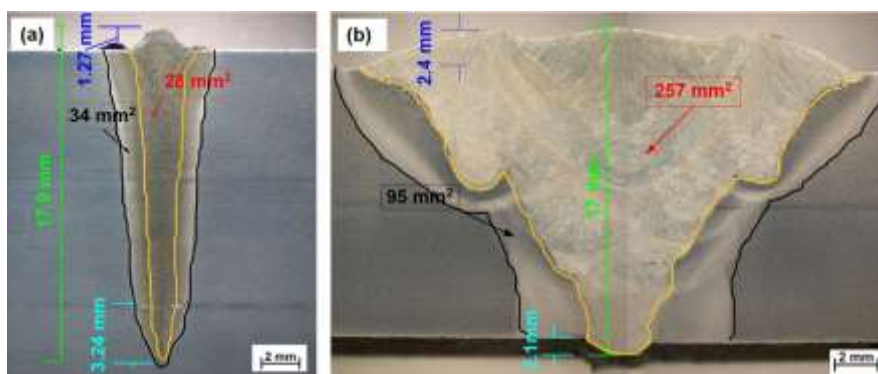
5. táblázat Az ívhegesztés és az elektronsugaras hegesztési technológiai sajátosságainak összehasonlítása

Jellemző	Huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés	Elektronsugaras hegesztés
Hegesztési sorok száma	9	1
Hozaganyag	igen	nem
Hegesztési sebesség, mm/s	3-10 (sorfüggő)	10
Fajlagos hőbevitel rétegenként, J/mm	700	660
Hegesztési főidő, s	360 s	30

A táblázat adataiból látható, hogy elektronsugaras hegesztés esetén jelentősen rövidebb hegesztési főidő mellett, hozaganyag alkalmazása és leélezés nélkül lehetett elkészíteni a hegesztett kötést. Ugyanakkor a mellékidők szempontjából érdemes megemlíteni, hogy az elektronsugaras hegesztés a lemezek pontosabb előkészítését igényli, valamint a kívánt varrat tulajdonságokhoz szükséges vákuum elérése is viszonylag sok időt vesz igénybe.

3.1 Makrovizsgálat

A Zeiss sztereo mikroszkópon elvégzett makrovizsgálatokat megelőzően a csiszolatokat a polírozást követően 2% Nital marószerrrel marattuk. Az elektronsugaras és a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült hegesztett kötések makrocsiszolata 2. ábrán szerepel, amelyeken a varrat és a hőhatásövezet területét is megadtuk a számszerűsíthető összehasonlítás érdekében. Az elektronsugaras hegesztéssel készült varrat területe mindösszesen tizede, a hőhatásövezeté pedig harmada a hagyományos technológiával készült hegesztett kötésnek.

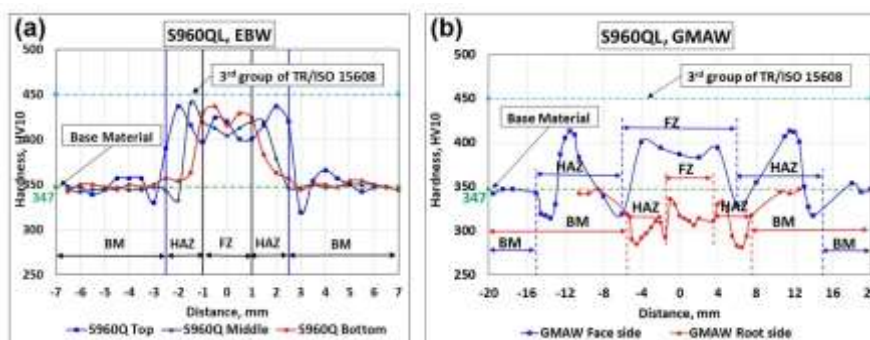


2. ábra

A varrat és a hőhatásövezet makrocsiszolaton mért területe huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés (a) és elektronsugaras hegesztés (b) esetén

3.3 Keménységvizsgálat

A keménység vizsgálatokat Reichert UH250 univerzális makro keménységmérő berendezéssel végeztük el HV10 vizsgálati terhelés mellett. Az elektronsugaras hegesztett kötésen a keménységmérést három vonal mentén (korona oldalhoz közel, közepén, valamint a gyök oldalhoz közel) végeztük el, a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült kötésen pedig a korona és a gyökoldalon mértünk keménységet a felülettől 2 mm távolságban. A keménységvizsgálatok eredményeit a 3. ábra szemlélteti. A vizsgálatok értékelését az MSZ EN ISO 15614-1 és az MSZ EN ISO 15614-11 szabványok szerint végeztük el, amelyek alapján a CR ISO 15608 szabvány szerinti 3. anyagcsoportnál a hegesztett kötésben megengedett legnagyobb keménység 450 HV10. Az alapanyag átlagos keménysége 347 HV10 volt. Mindkét hegesztéstechnológia során a legnagyobb keménység a hőhatásövezetben alakul ki. Elektronsugaras hegesztésnél a legnagyobb keménységértékek megközelítik, de nem érik el a megengedett 450 HV10 határértéket. Az elektronsugaras hegesztéssel készült varrat keménysége nagyobb az ívhegesztett varraténál, különösen a gyökoldal esetén. Ennek oka, hogy többretegű varratfelépítés esetén a töltő- és a takaró sorok áthőkezelik a korábban elkészített rétegeket, amelynek eredményeként akár kilágyulás is jelentkezhet, ahogyan az a 3. ábra (b) részletén is látható.



3. ábra

3.4 Szakítóvizsgálat

Az eljárásvizsgálati szabványok által megkövetelt 2-2 db keresztirányú próbatesteken a szakító vizsgálatokat ZD 100 (1000 kN) hidraulikus anyagvizsgáló gépen végeztük el. Az autogén elektronsugaras hegesztett kötés és a hozaganyaggal készült huzalelektrodás védőgázos ívhegesztett kötés esetén is a szakadás mindegyik próbatest esetén az alapanyagban következett be. Az MSZ EN ISO 15614 szabvány 1. és 11. kötete alapján a hegesztett kötés szakítószilárdsága nem lehet kisebb az alapanyag megkövetelt szakító szilárdságánál, amely 980 MPa a vizsgált ötvözet esetében. Az elektronsugaras hegesztéssel készült kötésből kimunkált próbatesteknél a szakítószilárdság 1038 és 1049 MPa volt, az ívhegesztés esetén pedig 1025 és 1035 MPa.

3.5 Műszerezett ütővizsgálati eredmények

A műszerezett ütővizsgálatok során Heckert típusú műszerezett ütőművet alkalmaztunk. Az alapanyagra vonatkozó követelmény alapján az előírt ütőmunka érték 27 J -40 °C-on. Az alapanyag műbizonylatán 75 J érték szerepel, miközben az alapanyagon elvégzett vizsgálatok során 162 J átlagos ütőmunkát mértünk. A hegesztett kötés részeiből 5-5 szabványos Charpy-V ütőpróbatestet munkáltunk ki. A hőhatásövezetet jellemző próbatestek esetében a bemetszés beolvadási vonaltól mért távolsága 1 mm volt. Az elvégzett műszerezett ütővizsgálatok legfontosabb eredményeit a 6. táblázat tartalmazza, amelyben W_i a repedésindulásra fordított energia százalékos arányát jelzi a teljes ütőmunkához képest, W_t pedig a repedésterjedésre fordított energia arányát mutatja. Minél nagyobb a repedésindulásra fordított energia aránya a törés során elnyelt energiához képest, annál ridegebben viselkedik a próbatest.

6. táblázat A műszerezett ütővizsgálatok eredményei -40 °C-on

		F_{max} , kN	KV, J	$KV_{\text{átl}}$, J	W_i , %	W_t , %
AA	1	29	206	162	20	80
	2	29	135		27	73
	3	28	85		20	80
	4	32	184		21	79
	5	30	199		19	81
HHÖ	1	34	43	45	82	18
	2	31	39		88	12
	3	29	27		94	6
	4	33	57		88	12
	5	33	57		85	15
V	1	34	64	44	96	4
	2	31	20		87	13
	3	34	55		74	26
	4	32	62		59	41
	5	28	20		83	17

A táblázatban szereplő eredményekből látható, hogy a varratban és a hőhatásövezetben a szívósság jelentős mértékben lecsökken az alapanyaghoz képest. Bár az ütőmunka követelmény teljesül, a mért ütőmunka jelentős része (80-90%) a repedésindulásra fordított energiát jelenti, amely a próbatestek rideg viselkedésére utal, összhangban a töretfelület vizsgálatokkal. Az ütőmunka ugyanakkor nem rosszabb a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült hegesztett kötés esetében mért értékeknél, ahol a varratban 45 J, a hőhatásövezetben pedig 48 J átlagos ütőmunkát mértünk -40 °C-on.

4. Összefoglalás és következtetések

Az elvégzett kísérleti munka alapján az alábbi következtetéseket tesszük a vizsgált 15 mm lemezvastagságú S960QL anyagminőségű nemesített nagyszilárdságú acél hegesztésére vonatkozóan:

1. Az elektronsugaras hegesztéssel készült varrat mérete tizede, a hőhatásövezet mérete pedig harmada a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült kötésnek.
2. Autogén elektronsugaras hegesztéssel jó minőségű hegesztett kötések készíthetők a szilárdsági tulajdonságok romlása nélkül. A hegesztett kötés szakítószilárdsága hozaganyag nélkül is eléri az alapanyag szakítószilárdságát.
3. Az alkalmazott hegesztési paraméterek esetén az elektronsugaras hegesztett kötés keménysége sem a varratban, sem pedig a hőhatásövezetben nem éri el a maximálisan megengedett 450 HV10 keménységet, ugyanakkor az ívhegesztéssel készült kötéshez képest a hegesztett kötés mindkét részében nagyobb a maximális keménység.
4. Bár a szívósságra vonatkozó ütőmunka követelmény teljesült, mégis alapvetően ridegtörés ment végbe a varratban és a hőhatásövezetben, hasonlóan a hagyományos ívhegesztéssel készült kötéshez.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. Az elektronsugaras hegesztési kísérletek feltételeinek biztosításáért köszönet illeti a Steigerwald Strahltechnik Kft-ét (www.sst-ebeam.com) és magyarországi partnervállalatát az IGM Robotrendszerek Kft-ét.

Irodalomjegyzék

- [1] Maurer W, Ernst W, Rauch R, Vallant R, Enzinger N.: Evaluation of the factors influencing the strength of HSLA steel weld joint with softened HAZ. Welding in the World 2015, 59, 809–822. <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0262-z>
- [2] Májlínger K, Kalácska E, Russo Spena P. Gas metal arc welding of dissimilar AHSS sheets. Materials and Design 2016, 109, 615–621. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.084>
- [3] Gáspár, M: Nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéstechnológiájának fizikai szimulációra alapozott kutatása, PhD értekezés, 2016
- [4] Lukács J, Dobosy Á: Matching effect on fatigue crack growth behaviour of high-strength steels GMA welded joints. Welding in the World 2019, 63, 1315–1327. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00768-3>
- [5] Koncsik Zs: Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches. ICES2D 2019, CRC Press; 2020, 316–24. <https://doi.org/10.1201/9780367824037-38>
- [6] Blacha, S, Węglowski, M S, Dymek, S, Kopuściński M: Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded joints of high strength S960QL and WELDOX 1300 steel grades. Arch Metall Mater 2017; 62, 627–634. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0092>

A GYAKRAN HASZNÁLT LÁNGEGYENGETÉSI TECHNOLOGIÁK HŐCIKLUSAI ÉS HATÁSUK A HEGESZTETT SZERKEZETEK ACÉLJAIRA

HEAT CYCLES OF FREQUENTLY USED FLAMESTRAIGHTENING TECHNOLOGIES AND THEIR EFFECT ON STEELS IN WELDED STRUCTURES

Gyura László

Linde Gáz Magyarország Zrt,

Répcelak, Carl von Linde u. 1

laszlo.gyura@linde.com

Dr. Gáspár Marcell

Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és

Anyagtechnológiai Intézet

metgaspar@uni-miskolc.hu

Dr. Balogh András

Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani

és Anyagtechnológiai Intézet

baloghandrasdr@t-online.hu

A cikkben összefoglaljuk a lángtechnológiákhoz használható éghető és égést tápláló gázok fizikai jellemzőit, azok technológiai hatását, alkalmazásának előnyeit, hátrányait. Ismertetjük a láng egyengetés legfontosabb jellemzőit, paramétereit, a leggyakrabban alkalmazott eszközeit. Különböző feltételekkel (eltérő technológiai paraméterek, eszközök, lemezvastagságok, ipari gázok, hűtési viszonyok stb.) vizsgáljuk a technológia hatására kialakuló hőmérséklet eloszlásokat, a munkadarabok egy-egy pontjában kialakuló hőciklusokat. A kimért hőciklusok alapján fizikai szimulációval elemezzük azok lehetséges hatását az anyag mikroszerkeztére, annak mechanikai tulajdonságaira. A kísérlethez három különböző szilárdságú (350 MPa, 690 MPa, és 960 MPa) acélt használtunk fel. Összehasonlítjuk az egyszeri és a gyakorlatban előforduló többszörös hevítés hatását.

The paper summarizes the physical characteristics of flammable and oxidation gases used in flame technologies, their technological effects, and the advantages and disadvantages of their application. We introduce the most important features and parameters of the flame straightening and the most frequently used tools. Under different conditions (different technological parameters, devices, plate thicknesses, industrial gases, cooling conditions, etc.) we examine the temperature fields resulting from the technology and the heat cycles at each point of the workpieces. Based on the measured heat cycles, we analyze their potential effect on the microstructure of the material and its mechanical properties with physical simulation. Three steels of different strengths (350 MPa, 690 MPa, and 960 MPa) were used for the experiment. We compare the effect of single and multiple heating which is applied often in the practice.

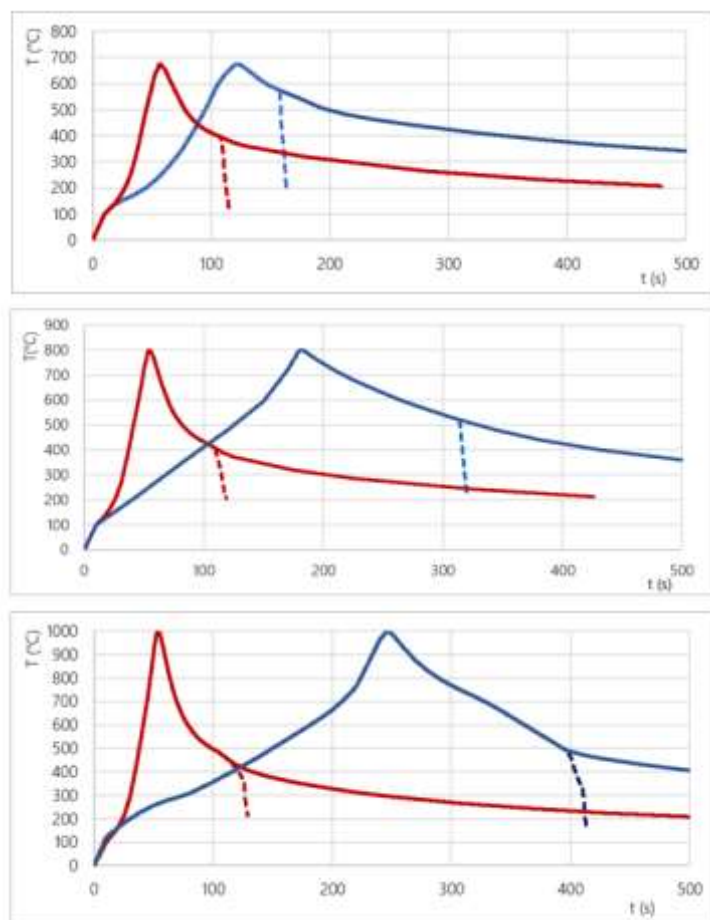
1. Bevezetés

A lángtechnológiák egyik, napjainkban is meghatározó, és gyakran használt eljárása a különböző fémszerkezetek lánggal történő egyengetése. Jellemzően az eljárás gépesítése legtöbb esetben nem megoldható, így a kézi technológiai paramétereinek (az egyengetés hőmérséklete, a hőtartás ideje, a hűlési viszonyok stb.) betartása különös figyelmet igényel, és egyben sok bizonytalanságot rejt magában. A technológia jellemzőiről és annak hatásaival kapcsolatos vizsgálataink egy-egy fázisairól már több cikkben beszámoltunk (pl. [1], [2], [3]). Terjedelmi korlátok miatt ezúttal elsősorban a gyakorlati melegítések során kimért hőciklusok alapján készített fizikai szimulációs vizsgálatainkat, és azok eredményeit mutatjuk be. A Miskolci Egyetemen található GLEEBLE 3500 típusú fizikai szimulátoron készített, a felvett hőciklusokkal terhelt próbatesteken különböző anyagvizsgálatokat (mikroszkópi vizsgálat, keménységmérés, üté vizsgálat) végeztünk, melyekről az alábbiakban számolunk be.

2. Hőciklusok a fizikai szimulációkhoz

Vizsgálataink során célul tűztük ki, hogy a fizikai szimulációval egyaránt modellezzünk olyan pontokban lejátszódó folyamatokat, amelyek egy valós egyengetés következtében kialakuló hevítés során közvetlenül az acél A₁ hőmérséklete alá, az A₁-A₃ hőmérséklet közé ill. A₃ hőmérséklet fölé hevülnek, és az egyengetésre jellemző feltételekkel hűlnek le. A különböző maximális hőmérséklethez tartozó hőciklusoknál így az említett három hőmérsékletet 675, 800, ill. 1000 °C-ban határoztuk meg. További célunk volt az alkalmazható éghető gázokkal létrehozott lángok közül az acetilén/oxigén láng, valamint a propán/oxigén láng hőciklusra, és azon keresztül az anyagban lejátszódó folyamatokra gyakorolt hatásának vizsgálata mind nyugvó levegőn, mind intenzív vízűtéssel történő lehűlés során.

A fenti célok megfogalmazása után az egyengetésre jellemző hőciklusok kimérése valós hevítés során különböző peremfeltételekkel történt (más-más lemeztavagságon, különböző teljesítményű és üzemű égőkkel, más-más hűlési kondíciókkal stb.). A próbatestek méretét 300x300 mm-re választottuk, melyeket közepén, gépi úton egyenletes sebességgel mozgatott égővel hevítettünk úgy, hogy a maximális hőmérséklet jellemzően 1000 °C fokot érjen el (amely gyakorlatilag minden acél típusnál jellemzően magasabb, mint a technológiához javasolt csúcs hőmérséklet [4]). A hevítés vonalától távolodva a hőhatásövezet különböző pontjaiban más és más, értelemszerűen egyre alacsonyabb csúcshőmérséklet alakul ki. A célul kitűzött további alacsonyabb maximális hőmérséklethez tartozó pontok elhelyezkedése, a hőhatásövezeten belüli hőmérséklet eloszlás egy adott lemeztavagság esetén az adott égő mozgatási sebesség mellett elsősorban a láng teljesítményétől, annak jellegétől függ. Bár több vastagságú lemezen végeztünk vizsgálatokat, a szimulációs próbák számának kezelhetősége és végrehajthatósága miatt csak a 30 mm-es S355J2+N anyagú lemezhez tartozó méréssel felvett hőciklusokat használtuk fel. Ennek oka, hogy ebben az esetben feltételezhetően a vastagság irányú hőelvezetés miatt a hűlési sebesség nagyobb, ezáltal kritikusabb, mint ennél vékonyabb lemezeknél, továbbá az ilyen méretű lemezeknél kialakulhat már háromtengelyű feszültségállapot, ami az anyag szerkezetében történő változás hatására a szerkezet szempontjából veszélyes lehet. A vizsgált lemezek közepén, a hevítés vonalára merőleges sík különböző pontján termoelemek segítségével felvett hőciklusokból, az adott maximális hőmérséklethez tartozó, a szimulációhoz használható görbék meghatározása több hőciklus alapján kis mértékű interpolációval történt. Az 1. ábra a leírt szempontok alapján a szimulációhoz felhasznált három különböző maximális hőmérséklethez tartozó hőciklusokat foglalja össze acetilén/oxigénes, valamint propán/oxigénes hevítés esetére, nyugvó levegőn, valamint intenzív vízűtéssel történő vízűtés során.



1. ábra

A szimulációhoz használt hőciklusok (piros: acetilén/oxigén láng, kék: propán/oxigén láng, folytonos vonal: nyugvó levegő hűtés, pont vonal: intenzív vízűtés hatása)

3. A fizikai szimulációs eredmények

A különböző szilárdságú anyagokból kimunkált 10x10x70 mm méretű próbatesteket a bemutatott hőciklusokkal terheltük a GLEBBLE fizikai szimuláció során, majd különböző anyagvizsgálatokat (keménységmérés, mikroszkópi vizsgálat ütésvizsgálat) végeztünk, melynek eredményeit az alábbiak mutatják be.

3.1 Vizsgált anyagok

Három különböző szilárdságú, a normalizált, klasszikusnak mondható szerkezeti acélon, valamint termomechanikusan nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélokon végeztünk szimulációt. Az acélok típusát, vegyi összetételét, (feltüntetve a karbon egyenérték különböző módon történő meghatározását) az 1. táblázat foglalja össze.

	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr
S355J2+N	0,18	0,35	1,55	0,014	0,003	0,036	0,000	0,02
S690QL	0,14	0,22	1,19	0,008	0,001	0,087	0,0025	0,32
S960QL	0,16	0,20	1,22	0,011	0,001	0,055	0,001	0,20

	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	CE (IIW)	CET
S355J2+N	0,01	0,005	0,005	0,04	0,003	0,005	0,451	0,341
S690QL	0,04	0,3	0,027	0,05	0,006	0	0,468	0,308
S960QL	0,01	0,605	0,015	0,05	0,002	0,037	0,536	0,355

1. táblázat

A vizsgált acélok vegyi összetétele

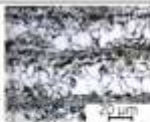
3.2 Optikai mikroszkópos vizsgálatok

A hőterhelésnek kitett próbatestek közepéről készült mikroszkópi csiszolatok képeit mutatja be a 2. táblázat, feltüntetve a mért keménységeket (keménységmérés ismertetése, az értékek részletesebb összehasonlítása lásd következő fejezet).

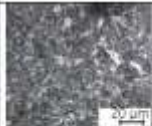
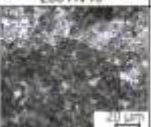
A *normalizált acél* eredeti, a hengerlésből adódó szerkezetének átalakulása már A₁ hőmérséklet alatt megindult, de a folyamat nem fejeződött be. A gyors vízűtésnél kis mértékű felkeményedést figyelhetünk meg, amely összefüggésbe hozható az eredeti perlites szövetrészek helyén kialakult ridegebb szerkezettel. Az A₁-A₃ hőmérséklet között a szerkezet jelentős átalakulása elsősorban a propán/oxigén hosszabban tartó hőciklusánál, azon belül is a lassú levegő hűtésnél látható. A részleges ausztenitesedési folyamat miatt azonban a teljes átalakulás nem történt meg, a keménység növekedés még elhanyagolható. Az A₃ hőmérséklet felett az eredeti szövetszerkezet bainit-martenzites szövetté alakult. A gyors vízűtés, különösen az acetilén/oxigén hevítés során néhány martenzites sziget kialakulásához, így a keménység értékének lokális növekedéséhez vezetett.

Az S690QL nagyszilárdságú acél finom szemcseszerkezete az A₁ hőmérséklet alatti hőterhelés hatására látszólag nem változott, és a keménység értékek is közel azonosak az alapanyag keménységével. Az A₁-A₃ hőmérséklet között a keménység kis mértékű csökkenése következett be, mellyel valószínű csökkennek az anyag szilárdsági tulajdonságai is. A vizsgálatok azonban egyértelműen igazolták a túlhevítés szemcsedurvító, valamint a gyors hűtés jelentős felkeményítő hatását. A keménységnövekedés mértéke ugyan nem tekinthető kritikusnak, de felveti a szívósság csökkenésének lehetőségét, bár ebből még egyértelmű következtetést nem lehet levonni (lásd később).

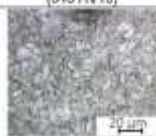
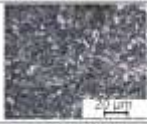
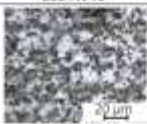
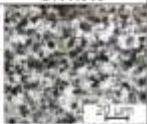
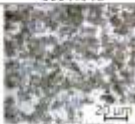
Az S960QL típusú acélnál A₁ hőmérséklet alatt az ausztenitesedés még egyértelműen nem indult meg, az anyag keménysége a megeresztés jellegű hőkezelés hatására kis mértékben csökkent. A szemcseszerkezetben változás a lassú hűtésnél kismértékű szemcsenövekedés látható. Az A₁-A₃ hőmérséklet közötti, hosszú ideig tartó, lassú hűléshez tartozó hőterhelések (főleg a propán/oxigén hevítésnél) a keménység csökkenése érzékelhető. A túlhevített acél intenzív hűtése jelentős keményedést okozott, amely a nagyszilárdságú acélok szívósságának csökkenéséhez vezethet.

	Acetlén/oxigén		Propán/oxigén	
Alapanyag: S355J2+N (152 HV10)	Hűtés			
	Levegő hűtés	Víz hűtés	Levegő hűtés	Víz hűtés
	Mikroszkópi képek/keménységek			
$T_{max}=675\text{ }^{\circ}\text{C}$	 158 HV10	 187 HV10	 156 HV10	 170 HV10
$T_{max}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$	 172 HV10	 173 HV10	 163 HV10	 168 HV10
$T_{max}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	 184 HV10	 210 HV10	 166 HV10	 170 HV10

a,

	Acetilen/oxigén		Propán/oxigén	
Alapanyag: S690QL (297 HV10)	Hűtés			
	Levegő hűtés	Víz hűtés	Levegő hűtés	Víz hűtés
	Mikroszkópi képek/keményiségek			
$T_{max}=675\text{ }^{\circ}\text{C}$	 296 HV10	 286 HV10	 278 HV10	 281 HV10
$T_{max}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$	 256 HV10	 256 HV10	 243 HV10	 283 HV10
$T_{max}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	 338 HV10	 350 HV10	 277 HV10	 343 HV10

b,

Alapanyag: S960QL (348 HV10)	Acéltén/oxigén		Propán/oxigén	
	Hűtés			
	Levegő hűtés	Víz hűtés	Levegő hűtés	Víz hűtés
	Mikroszkópi képek/keménységek			
$T_{max}=675\text{ °C}$				
	338 HV10	339 HV10	341 HV10	333 HV10
$T_{max}=800\text{ °C}$				
	321 HV10	346 HV10	294 HV10	340 HV10
$T_{max}=1000\text{ °C}$				
	354 HV10	407 HV10	318 HV10	402 HV10

c,

2. táblázat

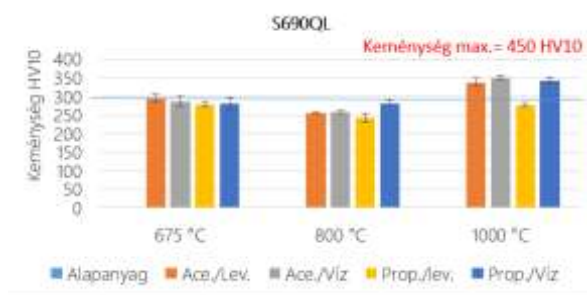
A szimulációs próbatestek mikroszerkezete, és a mért keménységértékek (a: S355J2+N, b: S690QL, c: S960QL)

3.3 Keménységvizsgálatok

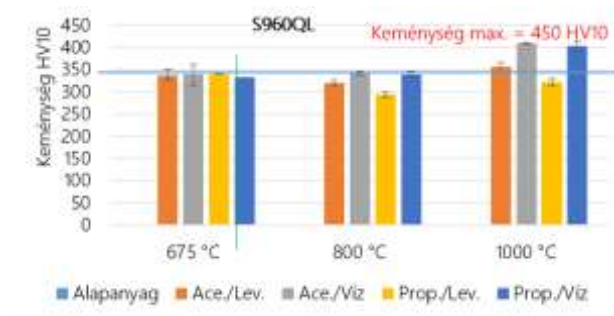
A GLEEBLE próbatestek hossz tengelyére merőleges középsíkban mért keménységértékeket foglaltuk össze a 2. ábrán. A keménységmérések a nevezett sík 5 pontjában történtek (egy dobókocka 5-ös oldalának megfelelő eloszlásban), mely mérések átlagát, és azok szórását mutatják az oszlopdiagramok. Összességében elmondható, hogy a próbatestek keménysége egyetlenegy esetben sem érte el a megengedhető kritikus értéket, amely normalizált acéloknál 380 HV10, nemesített nagyszilárdságú acéloknál 450 HV10 [5].



a,



b,



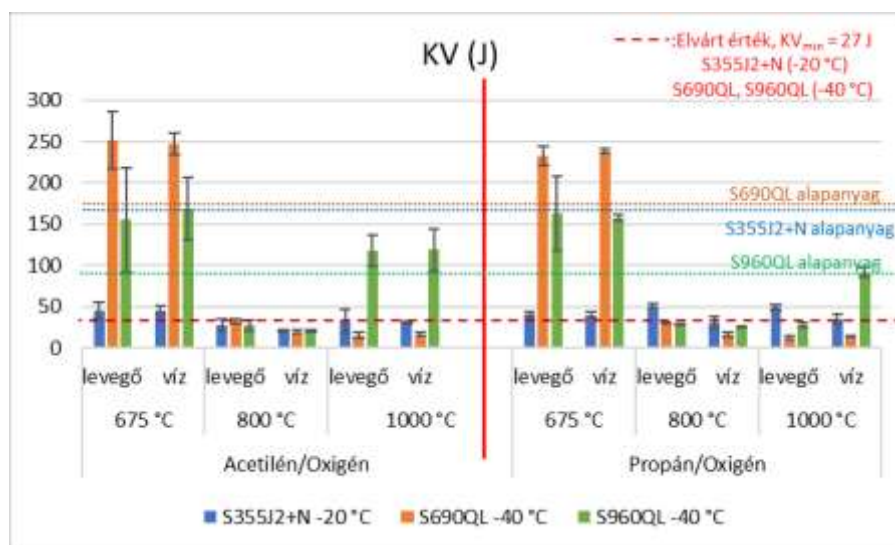
c,

2. ábra

A szimulációnak kitett próbatestek mért átlagkeménysége, és annak szórása (a.: S355J2+N, b, S690QL, c.: S960QL)

3.4 Ütő vizsgálatok

A szimulációnak alávetett próbatestekből szabványos Charpy-V ütőpróbatetek készültek (vizsgálati feltételenként 3-3 db), amelyek ütmunkáját a normalizált acél esetében -20 °C-on, a nemesített nagyszilárdságú acéloknál -40 °C-on vizsgáltuk, összhangban a rendelkezésre álló alapanyag műbizonylatokkal. Mindhárom anyagnál a minimális érték a vizsgálati hőmérsékleten 27 J kell legyen. Az ütmunkák átlagértékeit, azok szórásait, valamint az alapanyagok műbizonylat szerinti ütmunkáját a 3. ábrán foglaltuk össze.



3. ábra

A szimulációnak kitett próbatesteken mért átlagos ütmunka

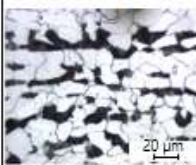
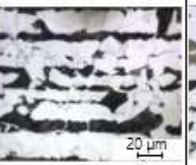
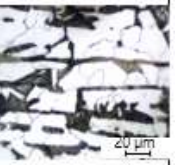
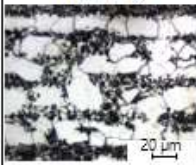
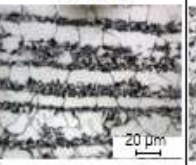
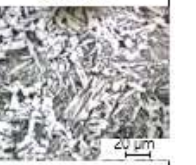
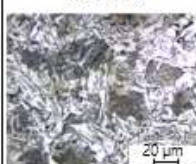
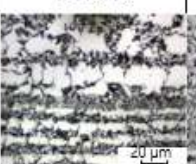
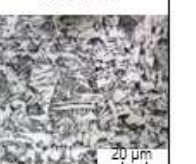
Általában hasonló tendenciák figyelhetők meg az acetilén/oxigén és a propán/oxigén melegítésének összehasonlítása során a hőmérséklet függvényében. A normalizált acél ütmunkája gyakorlatilag a csúcshőmérséklettől függetlenül jellemzően jelentősen csökken, és az elvárható minimális 27 J környékére esik (sőt 800 °C-nál az acetilénos hevítésnél az alá). A nagyszilárdságú acéloknál a 675 °C-os hőciklus a szívósság szempontjából kifejezetten előnyös, az ilyen hőciklusnak kitett anyagok szívóssága az alapanyagokéhoz képest növekszik. A 800 °C-os csúcshőmérsékleten történő hevítés kritikus hatású mindhárom acél szívósságára, különösen a gyorsabb hevítési és hűtési körülmények között (acetilén/oxigén + víz), amely visszavezethető ezen interkritikus hőmérsékleten kialakult helyi rideg zónák megjelenéséhez. Az A₃ feletti túlhevítés az S690QL acélnál további szívósságcsökkenést, viszont az S960QL acélnál némi növekedést okozott. A jelentősebb növekedés

elsősorban a rövidebb hőciklusok során (acetilén/oxigén hevítés) megmaradt finomszemcsés szövetszerkezet miatt következett be.

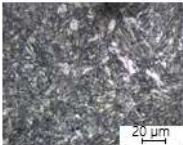
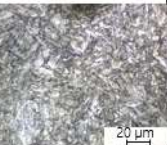
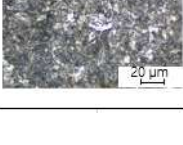
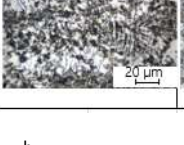
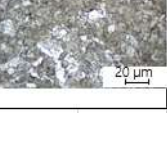
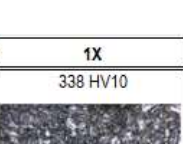
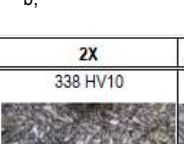
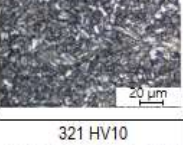
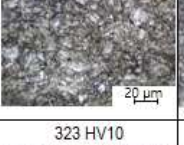
3.5 Többszöri hevítések vizsgálata

A gyakorlati egyengetési feladatok során gyakran előfordul (főleg első darabok gyártásánál, amikor még nincs meg a kellő gyártói tapasztalat), hogy az egyengetés érdekében végrehajtott hevítések nem érik el teljes mértékben a kívánt hatást, és további melegítésekre van szükség. Az egyengetés elvének alapján a már felhevített és kihűlt rész újbóli melegítése az alakváltozást egyértelműen tovább növeli. Kérdés azonban, hogy az acélok egyébként már megváltozott mechanikai tulajdonságaira az újbóli melegítés milyen hatással lesz. Ennek ellenőrzésére is végeztünk szimulációs vizsgálatokat, a gyakorlatban jellemző szakszerű egyengetési feltételekkel. A korábban bemutatott acetilén/oxigénes hevítéshez és levegőn való hűtéshez tartozó hőciklusokkal kétszer, ill. négyszer terheltük a próbatesteket. A 3. táblázat a három vizsgált acél többszöri (kétszeri, ill. négyszeri) hevítése utáni mikroszerkezeti és keménységváltozásokat mutatja, összehasonlítva az egyszeri hevítés utáni eredményekkel.

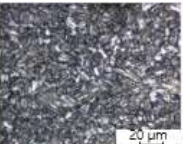
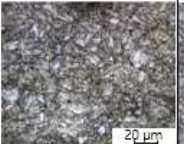
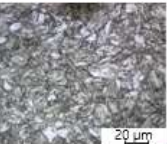
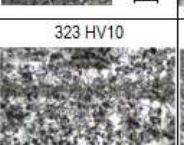
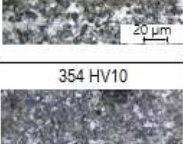
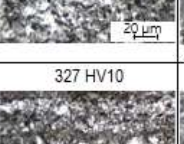
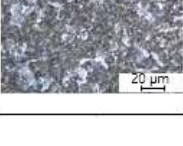
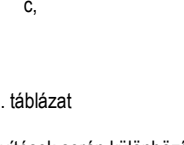
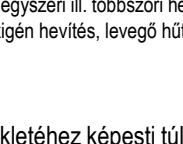
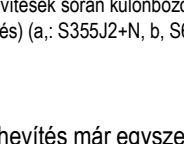
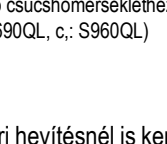
Egyértelműen látható, hogy 675 °C-os csúcshőmérsékletnél gyakorlatilag a többszöri hevítésnek a kialakult keménység értékére nincs számottevő hatása egyik acélnál sem. Elsősorban a normalizált acélnál ezen a hőmérsékleten a többszöri hevítés hatására kis mértékű szemcsedurvulás látható. Nagyszilárdságú acéloknál a négyszeres hevítés ugyan jelentős, de nem kritikus (450 HV10-nél alacsonyabb) keménységnövekedést okozott, a mikroszerkezet különösebb változása nélkül.

Hevítés száma	1X	2X	4X
675 °C	158 HV10 	164 HV10 	162 HV10 
800 °C	172 HV10 	175 HV10 	185 HV10 
1000 °C	184 HV10 	174 HV10 	189 HV10 

a,

Hevítés szám	1X	2X	4X
675 °C	296 HV10 	288 HV10 	270 HV10 
			
800 °C	256 HV10 	273 HV10 	336 HV10 
			
1000 °C	338 HV10 	271 HV10 	341 HV10 
			

b,

Hevítés száma	1X	2X	4X
675 °C	338 HV10 	338 HV10 	339 HV10 
			
800 °C	321 HV10 	323 HV10 	378 HV10 
			
1000 °C	354 HV10 	327 HV10 	390 HV10 
			

c,

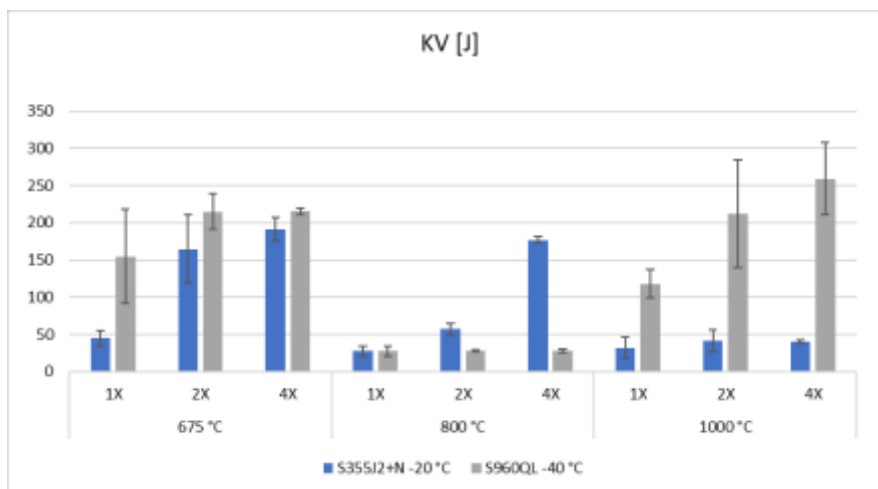
3. táblázat

A mikroszerkezet és a keménység változása egyszeri ill. többszöri hevítések során különböző csúcshőmérsékletekhez tartozó hőciklus terheléseknél (acetilén/oxigén hevítés, levegő hűtés) (a.: S355J2+N, b, S690QL, c.: S960QL)

A lánggyengetés technológiai hőmérsékletéhez képesti túlhevítés már egyszeri hevítésnél is keménységnövekedést okozott, amely a többszöri hevítések hatására tovább növekedett, bár a megengedett értékeket továbbra sem érte el.

A szívóssági, ütőmunka vizsgálatokat technikai okok miatt a normalizált és a 960 MPa nagyszilárdságú anyagnál végeztük csak el. A 4. ábrán látható vizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy a többszöri hevítések jellemzően nem rontják az egy hevítés után kialakult szívóssági értékeket, sőt a normalizált acélnál egyértelműen inkább javítják azt, melynek oka a perlit felbomlására vezethető vissza. Ugyanilyen szívósság növekedés érzékelhető a nagyszilárdságú acélnál is, kivéve az A₁-A₃

közötti interkritikus hőmérsékletre hevített esetben, ahol már az egy hevítés után is jelentősen csökkent, jellemzően a kritikus 27 J körüli szívóssági érték gyakorlatilag a több hevítés hatására szignifikánsan nem változott.



4. ábra

Az egyszeri és többszöri hevítésnek kitett próbatestek mért átlagos ütőmunkája, és azok szórása egy normalizált, és egy nagyszilárdságú acélnál

4. Összefoglalás

Valós körülmények közötti kísérletsorozaton keresztül részletesen feltérképeztük a lánggyengítés acetilén- és propánal történő hevítési és hűlési körülményeit, a hevítés vonalában és attól távolabb kialakuló hőciklusait. A különböző, de előre meghatározott maximális hőmérsékletű hőciklusok segítségével fizikai szimulációkat (egyszeri és többszöri hevítéssel) és anyagvizsgálatokat (optikai mikroszkóp, keménységmérés, ütővizsgálat) végeztünk a lánggyengítés várható hatásának előrejelzésére három acélmínőségen (S355J2 + N, S690QL, S960QL).

A kísérletek kimutatták, hogy a lánggyengítés jelentős hatással lehet a vizsgált acélok eredeti tulajdonságaira, amely mind a mikroszerkezet, a keménység, mind a szívósság változásában érzékelhető. A keménységértékek növekedése különösen intenzív vízűtés esetén figyelhető meg, bár az acélokra előírt megengedhető maximális keménységet jellemzően egyik esetben sem érték el.

A szívóssági értékek normalizált acélnál az alapanyagon mért értékhez képest minden esetben jelentősen csökkentek, különösen a magasabb hőmérsékletre hevített daraboknál, sőt több esetben kérdésessé vált a minimálisan megkövetelt 27 J ütőmunka elérése. Nemesített nagyszilárdságú acéloknál az A₁ hőmérséklet környékére hevítés, amely az acél gyártási technológiáját figyelembe véve egy magas hőmérsékletű megeresztési technológiának minősül, az acélok szívósságát az alapanyagon mért értékhez képest jelentősen megnövelte. Az A₁-A₃ közötti interkritikus hőmérsékletre hevítés viszont olyan mértékben csökkentette a nagyszilárdságú acélok szívósságát, hogy az akár kritikus is lehet (nem éri el a minimálisan megkövetelt 27 J-t). Az A₃ feletti túlhevítés viszont ismét egyértelmű szívósság növekedést eredményezett. A többszöri hevítések az egyszeri hevítéshez képest az acélok keménységét kis mértékben növelték, ugyanakkor a szívósságot jellemzően javították, kivétel a nagyszilárdságú acélok interkritikus hőmérsékletre történő hevítése, ahol az első hevítést követő nagyon alacsony szívóssági értéket érdemben már nem változtatták. Az alkalmazott éghető gázoknak (acetilén, propán), a hozzájuk tartozó hőciklusoknak a mechanikai tulajdonságok változására szignifikáns hatása gyakorlatilag nem volt.

A szimulációs kísérleti eredmények alapján a gyakorlatban alkalmazott valós egyengetésekhez tartozó hevítéseknel az alábbi szempontokat célszerű figyelembe venni:

- normalizált acéloknál, már az A₁ hőmérséklet alatti hevítés is jelentős szívósság csökkenéssel járhat, így a hevítés maximális hőmérsékletétől függetlenül kerülni kell túlzottan nagy területek, zónák egyszerre történő felhevítését (nagy rideg zónák kialakulásának elkerülése érdekében),

- a vizsgált nagyszilárdságú acélminőségeknél az A₁ hőmérséklet fölé történő hevítést egyértelműen kerülni kell, mert az ilyen hőmérsékletre hevült övezet rideggé válik, különösen igaz ez a A₁-A₃ közötti hőmérsékletre hevítésénél,
- bár nagyszilárdságú acéloknál a túlhevített zónában a szívósság jelentősen növekszik (a keménység növekedése ugyanakkor nem kritikus), ennek ellenére a túlhevítés egyértelműen kerülendő, hiszen a túlhevített zóna melletti hőhatásövezet azon része, amely A₁-A₃ hőmérséklet tartományra hevül kritikusan rideggé válhat,
- a hevítés utáni gyors vízűtés az acélok felkeményedése miatt egyértelmű kerülendő, a hevítést követő azonnali gyors hűtésnél akár a kritikus értékeket is elérhetjük,
- a lassú égésű gázokkal (pl. propán) történő hevítési/hűtési körülményeknél az acetilén/oxigén hevítéshez képest ugyan nincs jelentős különbség a mechanikai tulajdonságok változásában, de a hőhatásövezet szélességének, mértékének megnövekedése miatt a kritikus tulajdonságokkal rendelkező zónák mérete lényegesen nagyobb, szélesebb, ami az egész szerkezet szempontjából kockázatot jelenthet (tehát célszerűbb az acetilén/oxigén üzemű égők használata),
- az azonos helyen történő többszöri felmelegítés (ha a fenti javaslatokat betartjuk), nem okoz negatív változást az anyag szerkezetében, sőt az anyag szívósságát akár növelheti is, így amennyiben az alakváltozás növelése érdekében az első hevítés után további melegítésre van szükség, a hevítés ugyanazon a területen megismételhető.

Irodalomjegyzék

- [1] Gyura László, Kuti János, Balogh András: A lánggyenygetés hőciklusai
Multidiszciplináris tudományok, 9. évf. 4. sz. (2019) pp.142-151., Miskolc
- [2] Gyura László, Gáspár Marcell, Balogh András: A lánggyenygetési hőciklusok szövetszerkezetre gyakorolt hatása
Hegesztéstechnika, XXXI. évf. 2020/2 pp.39-44.
- [3] Gyura László, Gáspár Marcell, Balogh András: Investigation of thermal effects of flamestraightening on high-strength steels
In: Jármű K., Voith K. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 3. VAE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.
- [4] CEN/TR 10347:2006 Guidance for forming of structural steels in processing, BSI, ISBN: 0 580 49285 pp. 9-10 (2006)
- [5] EN ISO 15614-1:2017 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys (2017)

A FÉM ADDITÍV GYÁRTÁS AKTUÁLIS HELYZETE , ÚJDONSÁGOK ÉS FEJLESZTÉSI TRENDEK

CURRENT STATE OF THE METAL ADDITIVE MANUFACTURING, NOVELTIES AND DEVELOPMENT TRENDS.

Halász Gábor

Messer Hungarogáz Kft

gabor.halasz@messergroup.com

Absztrakt: Új szintre lép a Fém Additív Gyártás. Bemutatásra kerülnek a fejlődési előrejelzések, az additív gyártás legforróbb trendjeit, az alapanyagtól a kész darabok ellenőrzéséig, amelyek elősegítik a feldolgozóipar új szintre lépését. Összefoglaló a fém additív technológiáknál használatos alapanyagok gyártásfejlesztéséről, új alapanyagokról, a 3D nyomtatáshoz használatos tervezési, szimulációs és üzemeltetési szoftverek fejlesztéseiről. Fém nyomtatási eljárás változatok áttekintése és összehasonlítása különös tekintettel azok sorozatgyártásba való alkalmazhatóságáról. Am siker történetek bemutatása

Abstract: Metal Additive Manufacturing takes a new level. They showcase the developmental predictions, the hottest trends in metal additive manufacturing, from raw material to finished product inspection, which help the manufacturing industry take it to the next level. Summary of the development of raw materials used in metal additive technologies, new materials, the evolution of design, simulation and operation software for 3D printing. Overview and comparison of metal additive process variants with particular regard to their applicability in serial production. Presentation of AM success stories

1. Bevezetés

Az elmúlt években az additív gyártás ismertebb nevén a 3D nyomtatás és ezen belül a nyomtatható fém alapanyagok és a fém additív gyártási technológiák új szintre léptek. A berendezések és az anyagok folyamatos fejlesztése forradalmasítja az additív gyártási eljárásokat. Egyre másra jelennek meg új eljárás változatok, amelyek komoly konkurenciát jelentenek a már „hagyományos” 3D nyomtatási eljárásoknak, és ígéretesnek mutatkoznak a digitális sorozatgyártásra. Az additív gyártásban résztvevők felismerve, hogy alapjaiban kell megváltoztatni az eddigi gyártáskultúrát és az együttműködés fontosságának szerepét a fejlesztési folyamatban, elérték, hogy ezen technológiák lépésről lépésre alkalmassá válhatnak a digitális sorozatgyártásra.

1.1 Az additív gyártás (AM) aktuális helyzet

Az additív gyártásban (AM) érdekeltek tábora több szereplős, amelyben a gépgyártók mellett a tervező, szimulációs és üzemeltető szoftvergyártók, az alapanyaggyártók, az utómunkában érdekelt hőkezelő, forgácsoló berendezéseket gyártók, a minőségbiztosítással és kutatás- fejlesztéssel foglalkozó vállalatok, intézetek, kutató központok száma folyamatosan emelkedik. Az 1. ábrán látható összefoglaló térkép 2020. májusi információk szerint 231-re nőtt az AM-ben érdekelt cégek száma, amelyből 130 hardvergyártó, 31 szoftver, 47 alapanyag és 11 utómunkában érdekelt felszerelés-gyártót tartalmaz. [1]



1. ábra

Az AM térképe. Forrás: AMFG



2. ábra

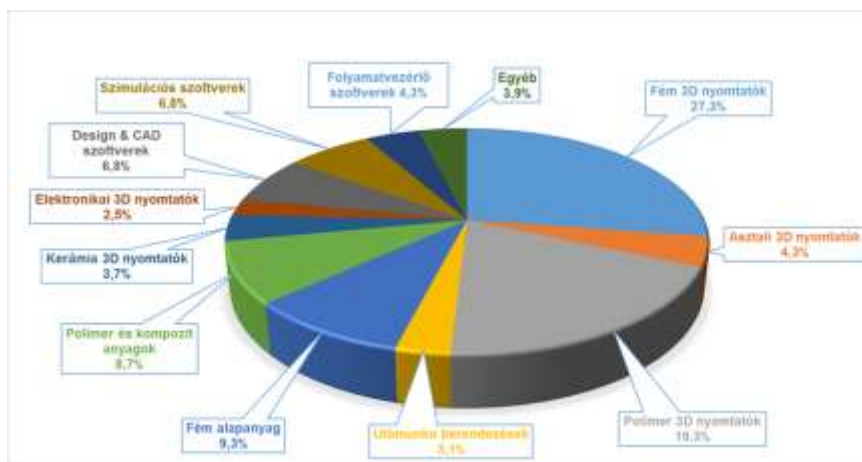
az AM piac fejlődési trend variációk. Forrás: 3D HUBS

Az AM fejlődését prognosztizáló 2020-as első negyedévében készült különböző elemzők előrejelzések alapján (2. ábra) az AM iparágban évente átlagos 24% növekedést jósoltak az elemzők. Azóta tudjuk, hogy a 2020-as rendkívüli év volt, amelynek elemzését még nem fejezték be a szakértők. Becslések szerint a COVID19 pandémia miatt a fém AM iparág 8-39 % közötti visszaesést produkálhat az előre jelzésekhez képest és a legrosszabb scenárió szerint a forgalom 2021-re fog visszaállni a 2019-es szintre. Hogy ez a megtorpanás milyen mértékű lesz ez most még nem tudható, de eddig ez az iparág egy rendkívül dinamikus fejlődést mutatott, amely remélhetően az eddigiekhez hasonló növekedési rátával fog folytatódni, ha a világ túl lesz a pandémián. [2] [3]

1.2 A fém additív gyártás helyzete

Az AM piac 2019-es forgalma meghaladta a 12 milliár USD. A piac szereplőinek részarányos forgalmát a 3. ábrán láthatjuk. Ennek alapján a fémnyomtató gépgyártók 27,3%-kal viszik el az első helyet, azt követik a polimer-nyomtatókat gyártók 19,3%-os forgalommal, illetve harmadik helyre alapanyag gyártók kerültek 18%-os forgalommal (9,3 % fém és 8,7% polimer és kompozit). A dobogós helyezetteket szorosan követik a szoftvergyártók 17,9% -os forgalommal, amiből 6,8% Design&CAD, 6,8% Szimulációs és 4.3% a termelés teljes körű irányítását vezérlő MES (Manufacturing Execution System) szoftverek. A forgalom kisebb szeleteit képviselik a Desktop nyomtatók (4,3%), kerámia nyomtatók (3,7%), utómunkálatokat és hőkezelő (HIP) berendezéseket gyártók (3,1%) az elektronikus áramköröket, eszközöket nyomtatók (2,5%), valamint az egyéb

szolgáltató, kutató, technológiát kidolgozó, stb. cégek forgalma. Ebből az látszik, hogy a fém additív gyártással kapcsolatos gép, alapanyag és szoftverpiac forgalma közel 43-44%-át teszi ki a teljes AM piaci forgalomnak. [4]



3. ábra

Az additív gyártás piac szereplőinek forgalmi részesedése 2019-ben. Forrás: AMPOWER

2. Fém AM eljárás változatok

A fém 3D nyomtatási eljárások száma évről évre növekszik. Az 4. ábra a technika jelen állása szerinti eljárásváltozatokat mutatja be a kötést létrehozó alapfolyamatok szerinti csoportosításban, feltüntetve az eljárás piktogramja alatt az elnevezést, az alapanyagfajtát és az alkalmazott energiaforrást is. Ebben a rendszerezésben az eljárások két nagy főcsoportba, az olvasztásos eljárásokra (melting processes) és a szintereléses eljárásokra (sintering processes) tagozódnak, amit kiegészít egy harmadik egyéb kategória.



4. ábra

Fém additív gyártás eljárás változatok osztályozása Forrás: AMPOWER

Az olvasztásos eljárásoknak két csoportja van a **porágyolvasztásos PBF (Powder Bed Fusion)** és a **koncentrált energiával végrehajtott anyagerakás DED (Direct Energy Deposition)** eljárásváltozatok.

2.1. Porágyolvasztásos additív technológiák - PBF

A **lézersugaras porágyolvasztást LB-PBF (Laser Beam Powder Bed Fusion)**, gyakran fém lézersugaras 3D-nyomtatásnak is nevezik. A lézersugaras porágyolvasztásos (LB-PBF) eljárásnál egy pár galvanométer tükör kombinált forgatásával mozgatják a nagy energiasűrűségű lézernyalábot az építési platformon terített fém porágyon. Az eljárás változatoknál a 100 - 1000 W teljesítményű lézersugár rétegről rétegre építi fel a munkadarabot az építési alapra, amelyet fokozatosan rétegenként süllyesztenek le. A rétegek vastagsága 20–100 µm közötti.

További eljárásváltozatok: *lézersugaras olvasztás (LBM- Laser Beam Melting)*, *szelektív lézer szinterezés (SLM- Selective Laser Melting)*, *lézersugaras fémolvasztás (LMF-Laser Metal Fusion)*, *közvetlen fém nyomtatás (DMP-Direct Metal Printing)*.

A **elektronsugaras porágyolvasztás EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion)** technológia szintén fémporral dolgozik, itt viszont egy nagyenergiájú pásztázó elektronnaláb segítségével készülnek el a rétegek egy vákuumkamrában.

2.2. Anyaglerakás koncentrált energiával - DED

Lézersugaras Additív Gyártás - LBAM (Laser Beam Additive Manufacturing) eljárás változatokban a lézersugár fókuszfoltjába juttatott por vagy huzal megolvasztása által lerakott varratokból készül el rétegenként a darab. Az eljárásváltozatok közül van olyan, ahol egyidejűleg különböző összetételű porokkal is kivitelezhető a rétegek lerakása, ami lehetőséget kínál a felület tulajdonságainak folyamatos megváltoztatására.

Eljárás változatok: *LMD (Laser Metal Deposition)*; *LENS (Laser Engineering Net Shape)*; *Laser Cladding*, *Laser Generation*; *LBMD (Laser-Based Metal Deposition)* *LFF (Laser Freeform Fabrication)*; *Laser Direct Casting*; *Laser Cast*, *Laser Consolidation*, *LasForm* neveken ismert eljárásokat is ebbe a csoportba sorolják. Ezen eljárásváltozatoknál egy vagy több fűvőkán keresztül a fémpor automatizálva a lerakást végző fejen, vagy külön adagolón kerül bevezetésre, és ezt a lézersugár vékony rétegben megolvasztva hernyóvarratot képez, amelyeket megfelelő átfedéssel raknak egymás mellé, így rétegről rétegre építve fel a darabot.

Elektronsugaras Additív Gyártás – EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) az elektronsugaras huzaladagolású eljárásváltozat, amely a vákuumkamrába huzadagoló segítségével bejutatott huzalt olvasztja meg és így építi fel rétegről rétegre az alkatrészt.

2.3. Ívhegesztéses additív technológiák

A huzaladagolású additív eljárásváltozatokhoz plazma vagy elektromos ív használható. A **huzaladagolású védőgázos ívhegesztéses additív gyártás - WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)** is komoly fejlődésen ment keresztül. Ehhez nagymértékben hozzájárul a hegesztőrobotok nagy pontosságú vezérlései, hajtásai és az adaptív hegesztési eljárásváltozatok fejlesztése. A hegesztési paraméterek nagyon szűk tartományon belüli alkalmazásával lehetővé vált a vékonyfalu testek hegesztéssel történő létrehozása, illetve bonyolult struktúrák kialakítása.

2.4. Anyagkiszajtolásos eljárás – ME

A **szálkiszajtolásos modellezés (FDM - Fused Deposition Modelling)** eljárásoknál fémhuzalt vagy egy különleges műanyag hordozóanyagba kevert fémport tartalmazó huzalt úgynevezett filament alapanyagot olvadáspont alatti hőmérsékletre melegítenek, és sajtoló fűvőkán keresztül juttatják ki a felületre rétegenként felépítve az úgynevezett „zöld” darabot. A „zöld” daraból ezután a műanyag hordozót mechanikus, majd vegyi tisztítási műveletet követően eltávolítják és kapjuk a „barna” darabot, amiből szinterezéssel állítják elő a végső alkatrészt. Ezen eljárásoknál a zsugorodás mértéke elérheti akár a 20 %-ot is. Eljárás változatok: *FLM (Fused Layer Modeling, Fused Layer Manufacturing)*; *FFF (Fused Filament Fabrication)*; *BPE (Bound Powder Deposition)*; *ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing)*; *FMP (Filament Metal Printing)*; *MFDM (Metal Fused Deposition Modeling)*.

A **fröccsöntéses szálkiszajtolásos modellezés - MIM FDM (Metal Injection Molding Fused Deposition Modeling)** a fröccsöntést és a sajtolást kombináló eljárások, ahol fémgranulátumok képezik az alapanyagot.

2.5. Kötőanyag kilövelléses eljárás - BJ

A **kötőanyag kilövelléses (BJ)** eljárás elve hasonló a tintasugaras papírnymtatáshoz használt eljáráshoz, csak itt nem festékanyagot, hanem kötőanyagot fecskendeznek fémporra. Az elterített fémport a kívánt mintázat szerint egy pásztázás alkalmával több sor fűvőkán keresztül finomcseppek folyadék kötőanyaggal rögzítik, így alakítva ki soronként a kívánt végső darab „zöld” darabját. A nyomtatást követően kicsomagolják, a felesleges port eltávolítják, majd tisztítást után kapják a „barna” darabot, amiből szinterezéssel készítik el a végső darabot, amely max. 20%-kal zsugorodik a zöld darabhoz képest. Eljárás változatok: *3D nyomtatás; (Three Dimensional Printing)*, *Inkjet 3D Printing*; *SPJ (Single Pass Jetting)*.

2.6. Anyagkilövelléses eljárás– MJ

Az **anyagkilövelléses eljárás** tulajdonképpen **nanorészecske nyomtatás NPJ** (Nanoparticle Jetting), ahol nem kötőanyagot fecskendeznek egy platformra, hanem olyan speciális folyadékot, amelyben szuszpendált nano fémrészecskék találhatók. A terítést több száz fúvókán keresztül végzik és cseppenként építik fel a nagyon vékony, extrém magas felbontású rétegeket. A nyomtatófej elhaladását követően a hordozó folyadékot elpárologtatják, így alakítva ki soronként a kívánt végső darab „zöld” darabját. A nyomtatást követően kicsomagolás és tisztítást után a „barna” darabot szinterezik.

2.7. Egyéb eljárások

Ebben az osztályban az ultrahangos additív eljárás, a dörzshegesztéses additív eljárás, az ellenállás-hegesztéses additív eljárás, valamint további speciális területre kifejlesztett, illetve kifejlesztés alatt álló eljárások találhatók.

2.8. A fém additív gyártási eljárások piaci eloszlása

A fém additív gyártás eljárás változatok legfrissebb 2020-as összefoglalóját a 5. ábrán láthatjuk. Itt az eljárás változatok elnevezése mellett feltüntették a gyártókat, illetve az adott eljáráshoz alkalmazott alapanyag fajtát (por, huzal, filament stb.).

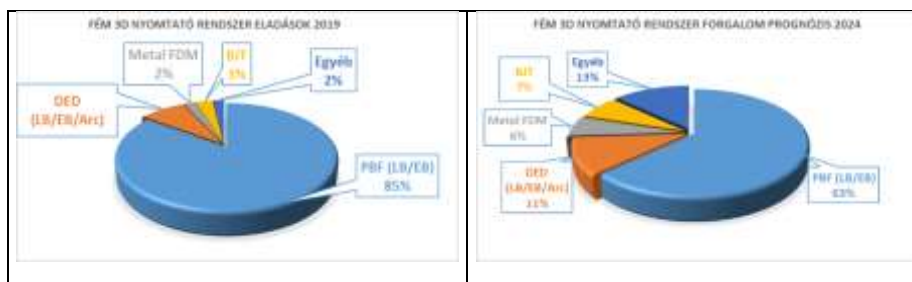
A 5. ábrán az alapanyagok korongjának szélén a zöld sáv jelzi azokat a „három lépéses” eljárás változatokat, amelyek a nyomtatás és kötőanyag eltávolítást követően szinterézést igényelnek. A fém additív gyártás eljárás változatokat összefoglaló ábrán a gyártók száma az adott eljárás elterjedését, népszerűségét, az eljárás változat AM piacon elfoglalt helyzetét szemlélteti. Egy régebben fejlesztett eljárás változatnál nagyobb számú gyártót láthatunk, míg a feltörekvőknél jóval kevesebbet, illetve egy új eljárás változatnál esetleg csak egyet.



5. ábra

Fém additív gyártás eljárás változatok. Forrás: AMPOWER

A fém additív gyártás piacát a porágyolvasztásos (PBF) lézersugaras (LB) és elektronsugaras (EB) technológiák dominálták. 2019-ben a porágyolvasztásos eljárások (PBF) 85%-ot generált a rendszerszolgáltatók bevételeiből. Ez a piaci szegmens közel 5%-ot növekedett az előző évhez képest. A koncentrált energiával végzett anyaglerakásos (DED) lézersugaras, elektronsugaras és elektromos ív (DED-LB/EB/Arc) technológiák 8%-ot képviseltek a globális rendszerbevételek piaci részesedésében, míg a fém szálkiszajtolásos modellezés (FDM), a kötőanyag kilövelléses (BJT) és egyéb technológiák összege kb. 7%-os. 6. ábra.



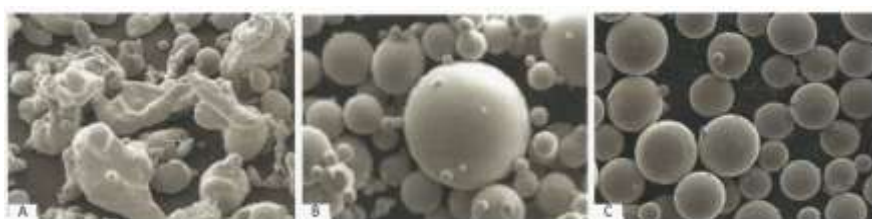
6. ábra

Fém AM rendszer eladások 2019-ben és az előrejelzés 2024-ra. . Forrás: AMPOWER

Ebből is látható, hogy napjainkban a fém AM piacot túlnyomó részt a porágyolvasztásos – PBF- technológiák uralják, de az elkövetkező öt évben az elemzők szerint a részarányuk 63%-ra fog csökkenni, míg az anyaglerakás koncentrált lézersugár / elektronsugár / ivenergiával (DED-LB/EB/Arc) 11%-ra, a fém szálikisajtolásos medellezés (FDM) 6%, valamint a kötőanyag kilövelléses eljárások (BJT) 7%-ra nő. Az új és még fejlesztés alatt álló egyéb technológiák szerepe is erősödni fog az elkövetkező években. [5]

3. A fém AM alapanyag gyártás

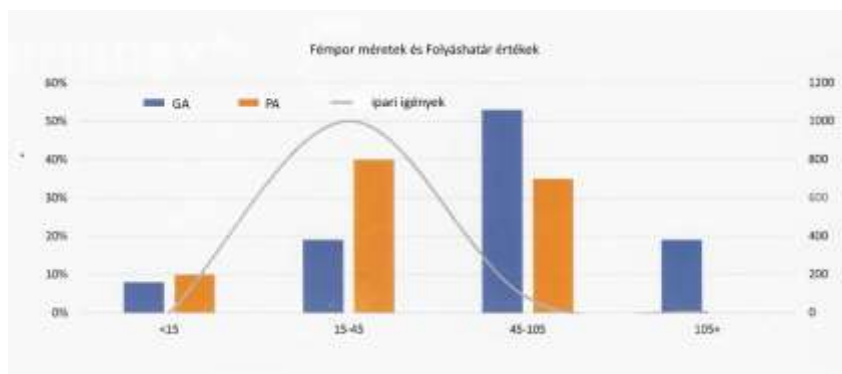
A fémport alkalmazó technológiák dominanciája miatt nagy hangsúly helyeződik a szükségleteket kielégítő alapanyagokra, amik víz-, gáz- vagy plazmaatomizációs eljárásokkal készülnek. A gáz- és a plazma atomizációs technológiák jó, illetve kiváló minőségű fémporok előállítására alkalmasak. A vízatomizációs eljárásokkal készülő porok a gyengébb minőség miatt fokozatosan a háttérbe szorulnak. A különböző eljárásokkal készült porok morfológiáját mutatja a be a 7. ábra. A jó minőségű termékek előállításának egyik záloga a jó alapanyag, amelynél elvárás a homogén összetétel és méret, továbbá a minél kisebb szórást mutató gömb formájú szemcsék. Az alapanyag-gyártók is egyre jobb minőségű és egyre kisebb (15-50 μm) átmérőjű porokat kínálnak a fémporok számára, az igényeknek megfelelően. Erre egy jó példa az igen gyakran alkalmazott Ti6Al4V ötvözet esetében az alkatrészek előállítására használt különböző átmérőjű porok.



7. ábra

Ti6Al4V ötvözet víz (A), gáz (B) és plazma (C) atomizációs eljárásokkal készült alapanyagok morfológiája [6]

A 8. ábrán. gáz (GA) és plazma (PA) atomizációval készült részecsék méret szerinti százalékos eloszlását, a méretek és a folyáshatár kapcsolatát, valamint az ipari igényeket látjuk feltüntetve. A 45-100 μm tartományban készült poroknál a gáz atomizációs eljárással készült porok folyáshatára a legmagasabb, bár amint látható, ez az ipari elvárások csak kis hányadát fedi le. Az ipari igényeknek leginkább megfelelő tartományban a plazma atomizációs porok folyáshatára a legmagasabb, ezen porok méret szerinti eloszlásgörbéje közelít legjobban az ipari igények elvárásait leíró görbéhez. [6]



8. ábra

Ti6Al4V ötvözet GA és PA eljárásokkal készült alapanyagok méreteloszlása és folyáshatár értékei [6]

Az egyre jobb minőségű alapanyagoknak köszönhetően a nyomtatott termékek felületi érdessége csökken, finomabb részletek nyomtatását teszik lehetővé. Külön terület a fém nanorészecskéket tartalmazó alapanyagok gyártása. A fémnyomtatásra használt anyagok, így a korrózióálló acélok, alumínium ötvözetek, titán ötvözetek, szerszámacélok, nikkel ötvözetek, Cr-Co ötvözetek, réz és rézötvözetek palettája is folyamatosan bővül. A különböző iparágak, jellemzően az energetika, elektronika, járműipar, űrtechnológia és egészségügy szükségleteinek kielégítésére újabb és újabb anyagok kerülnek kifejlesztésre.

Bár a felhasználást figyelembe véve a fémporok dominálnak, az AM technológiáknál feltétlenül meg kell említeni a különleges AM számára gyártott hegesztő huzalokat, bevonatos porokat vagy filamenteket, granulátumokat, pelletákat, lemezeket, valamint a BJ és MJ számára a ragasztó és hordozó folyadékokat. A globális vegyipari vállalatok (9.ábra.) egyre nagyobb mértékben kapcsolódnak be az AM alapanyaggyártásba és az új anyagok fejlesztésébe. Elemzők szerint ez az amúgy a hagyományos szubsztraktív technológián alapuló gyártás alapanyag árakhoz képest akár 10 szeres árú AM alapanyagok árának lassú csökkenését fogja eredményezni a jövőben. Az együttműködés egyre fontosabb szerepet kap a kutatás fejlesztésben. A fejlesztési tevékenység erősödése eredményeként számos új anyag megjelenése várható. A fémötvözetek mellett a kompozit anyagok felhasználásának részaránya is emelkedni fog az elkövetkező években.



9. ábra.

az AM alapanyag gyártásba résztvevő globális vegyipari vállalatok Forrás: AMFG

4. Az additív gyártás láthatatlan szereplői

A gázok láthatatlanok, szerepük mégis lényeges, fontos szerepük van az alapanyagok, minőségi porok gyártásánál, valamint a 3D-nyomtatási, illetve hőkezelési környezetben a nedvesség és az oxigén távoltartásában, továbbá hatással vannak a gyors olvasztási és szilárdulási folyamatra. Az oxigén jelenléte nem kívánatos sem az alapanyaggyártásnál, sem a 3D-nyomtatásnál, mivel a keletkező oxidok károsan hatnak a végtermék minőségére, negatívan befolyásolják a porok alakját, a nyomtatással készült termékek mechanikai tulajdonságait, nyomtathatóságát. Ezért a fémporok gyártásánál és az additív gyártási környezetben a cél a 100 ppm (0,01%) alatti oxigénszint biztosítása.

Az alapanyag gyártásban jelentős szerepet kapnak a plazma-, a gáz- és a konfigurációs atomizációs technológiák továbbfejlesztett változatai, amelyek kiváló minőségű fémporok előállítására alkalmasak. A gázatomizációs eljárásoknál a rúd alakú alapanyagot indukciósan vagy plazmaívvvel olvasztják meg. A folyékony fémáram körül fúvókákon keresztül vezetnek a

gázt, amely expandálás következtében jelentős nyomáscsökkenést szenved, és megváltoztatja az olvadék áramlásának jellegét. Amennyiben az atomizációs gyártási folyamatban az olvadék megfelelően túlhevített, akkor a hengeres alakból először kúppá, majd olvadt vékony fémárammá alakul, ami elporlasztva különböző nagyságú, kedvező esetben gömb alakú szemcsévé szilárdul. Az atomizálásra használt gáz – nitrogén, argon vagy hélium – az olvadék tulajdonságaitól is függően befolyásolni fogja a keletkezett por tulajdonságait. A gömb alaktól való eltérés a szilárd oxidok létrejötte miatt alakul ki, amelyek a szemcsék felületén jönnek létre. Az oxidképződés drasztikusan megnöveli a viszkozitást, és ez meggátolja a gömb alakú cseppek létrejöttét. Ezért célszerű az oxigénmennyiséget a lehető legalacsonyabb szinten tartani. [7]

A lézersugaras porágyolvasztásos LB-PBF eljárásoknál alkalmazott védőgázok elsődleges feladata az olvadékfürdő védelme, de emellett legalább olyan fontos, hogy a gázáram eltávolítsa a keletkező fémgőzöket, részecskéket, amelyek a lézersugár energiájának részbeni elnyelésével instabillá tehetik a nyomtatási folyamatot. Az utóbbi időben nagyon komoly fejlesztések zajlottak le a gépgyártókban a gázok be- és kivezetését illetően. Áramlástan szakemberek bevonásával megnövelték a keringtető rendszer teljesítményét és lamináris áramlást biztosító rendszereket alakítottak ki. A gáz minősége és mozgatása meghatározó tényezője a jó nyomtatási minőségnek.

A szálkiszajtolásos modellezés (FDM), a kötőanyagkilövelléses (BJ), anyagkilövelléses (MJ) eljárásoknál is használnak argon védőgázt a semleges atmoszféra biztosítására a kötelező a szinterezésnél, illetve az izosztikus nyomáson történő hőkezelésnél (HIP), amely a nyomtatott darab végső alakjára, szemcse-szerkezetére, mechanikai tulajdonságaira, a porozitások és mikrorepedések csökkentésére van döntő hatással.

Az eljárás és az alapanyag függvényében különböző tisztaságú gázokat alkalmaznak. Ezeket különféle márka elnevezésekkel dobják piacra az ipari gázgyártók. A Messer az additív eljárások számára Addline néven forgalmazza termékeit. Ezekre a gázokra a nagy 99,996% (4.6) – 99,999% (5.0) tisztaság, illetve a rendkívül kis szennyezőhányad ($O_2 \leq 2$ ppm és $H_2O \leq 3$ ppm) jellemző. 10. ábra. [7]

Anyag	A megfelelő védőgáz			
	Argon	Hélium	Nitrogén	Nitrogén/hidrogén gázkeverék
Titán				
Alumínium				
Auszténites acélok, nikkelt				
Ferrites acélok				

10. ábra.

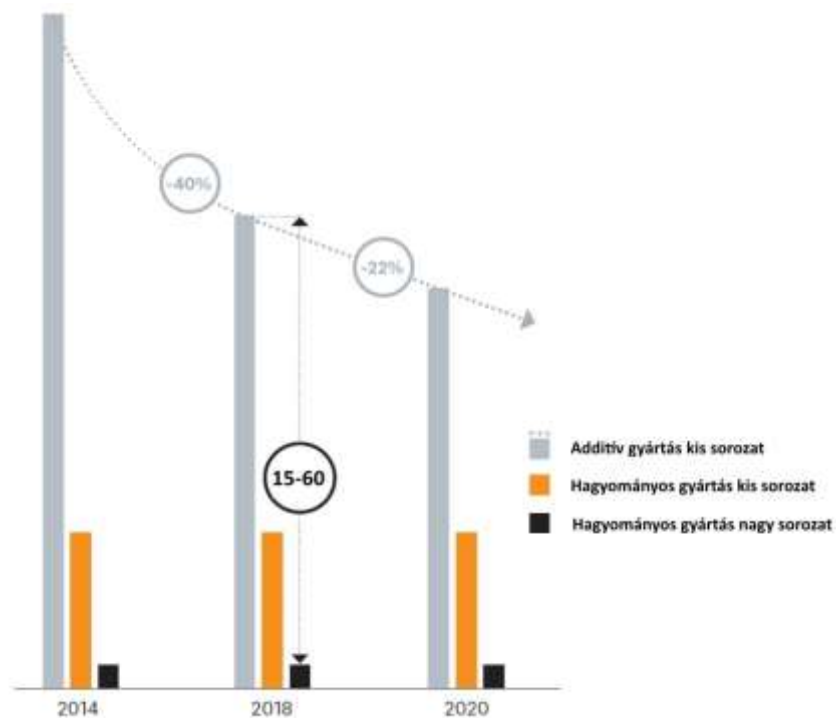
ipari gázok az additív gyártáshoz

5. Fém AM eljárások összehasonlítása

A fém additív gyártás sorozatgyártásba történő bevezetésén nagy erőfeszítésekkel dolgoznak a gépgyártók és a felhasználók, ám számtalan megoldandó feladat vár a fejlesztőkre. Ezek közül egy a költségek csökkentése. Jelenleg az AM technológiákra épülő sorozatgyártást összehasonlítva a hagyományos szubsztraktív technológiákra épülő sorozatgyártással, ez utóbbi jóval költséghatékonyabb. 11. ábra.

Az elmúlt évek fejlesztéseinek köszönhetően a csökkenő tendencia jól látható, 2014-2018 között 40%-kal csökkent az AM termékek előállítási költsége, majd 2018-2020 között további 22%-os csökkenés várható. Ezzel a jelentős csökkenéssel együtt

is még mindig 15-60 szoros a szorzó az AM és a hagyományos technológiával előállított termékek költsége között. Bizonyos területeken azonban már komoly áttörések történtek kisebb vagy nagyobb sorozatban készülő termékekénél, ahol a termék komplexitása, egyedisége vagy egyéb feltétel miatt, előnybe kerül az additív gyártás. Ilyen területek a légitjármű az űripar és az energetikai szektor. [8]

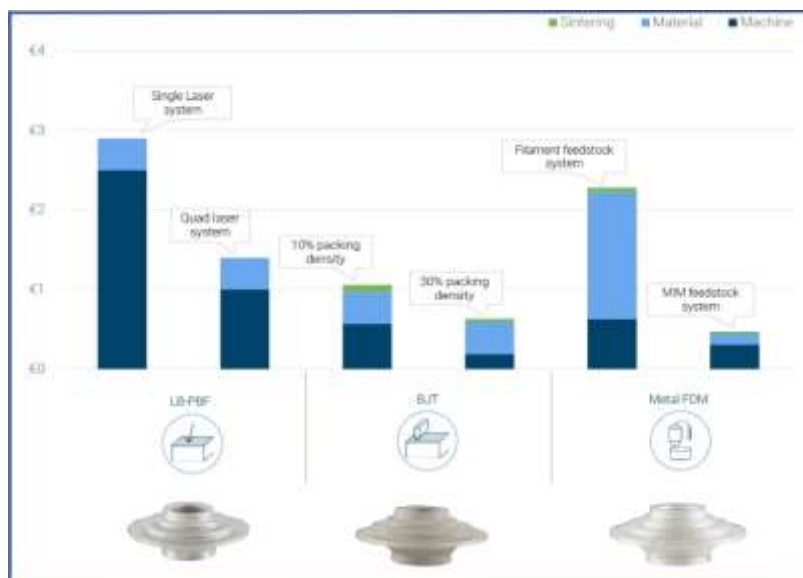


11 ábra

AM vs hagyományos technológia. Forrás: Roland Berger

Egy költségeket összehasonlító tanulmányban ugyanazt az egyszerű kis alkatrészt készítették el lézersugaras porágyolvasztásos (LB-PBF); fémszál kisajtolásos modellezéssel (FDM) és kötőanyag kilövelléssel (BJ) eljárás változatokkal 316-os korrózióálló acél alapanyagból, majd összehasonlították a nyomtatási költségeket (12. ábra, 1. táblázat;). Az összehasonlítás alapjául a különböző eljárásoknál alkalmazott alapanyagárak, a gyártási sebesség és a berendezések óradíjai szolgáltak, amelyek figyelembe vették a berendezések beszerzési árát és az értékcsökkenést. A hőkezelés, utómunka költségek, és a minőségellenőrzési díj nem szerepel az összehasonlításban. [9]

A legdrágább eljárás a lézersugaras porágyolvasztásos (LB-PBF) egy lézersugaras változata 2,8 euró/db árral. Ezt követi a fém szálkisajtolásos (FDM) filament hozaganyagot használó változata 2,3 euróval, majd a lézersugaras porágyolvasztásos (LB-PBF) quad-lézeres változata kb. 1,4 euróval. A kötőanyag kilövelléssel BJT 10%-os kitöltési sűrűségű munkamenet esetén 1,1 euró, míg 30%-os kitöltéssel 0,6 euró, végül a fém szálkisajtolásos modellezés (FDM) eljárás poros változatával mindössze 0,4 euró egy darab nyomtatási költsége.



12. ábra

Fém AM technológiák összehasonlítása. Forrás: [9]

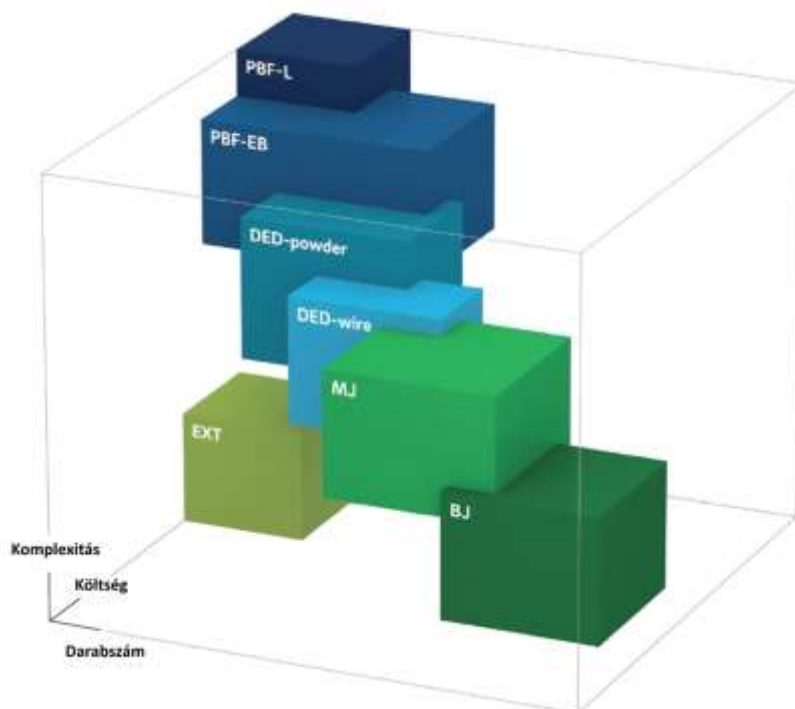
A legdrágább és a legolcsóbb AM előállítási költségek között többszörös a különbség. Nagyon fontos mérlegelni az eljárás kiválasztásakor, hogy az adott alkatrész milyen szilárdsági, fáradási, korrózióállósági, felületi érdességi, esztétikai stb. követelményeknek kell eleget tegyen. A gyártáshoz a szükséges és elégséges feltételeket biztosító eljárást célszerű választani.

1. táblázat. Különböző fém AM eljárások gyártási költségeinek összehasonlítása

	LB-PBF	BJT	FDM
Berendezés ár €	250.000 -500.000	250.000 – 500.000	60.000 -100.000
Alapanyag ár €/kg	40 - 80	5- 10	15-18, 100 -200 (F)*,
Óradíjak €/h	30-40 sl , 50-55 ml*	40-50	5 - 6
Nyomtatási ár €/cm³	1,5 – 2,8	0,6 – 1,1	0,5 -2,5

*sl – egy lézersugár , ml-több lézersugár, F-filament hozaganyag

Ha a fém AM eljárásokat egy a darabok komplexitását, az előállítási költségeket és a darabszámot figyelembe vevő koordináta rendszerben helyezjük el, akkor szemléletes módon kirajzolódik, hogy melyik eljárás milyen feladatokra alkalmas. (13. ábra)



13. ábra

Fém AM technológiák összehasonlítása. Forrás: Roland Berger

A porágyolvasztásos lézersugaras (PBF-L) eljárások nagyon bonyolult, nagy komplexitású alkatrészek előállítására alkalmasak, kis sorozatban, a legmagasabb gyártási költség mellett. A porágyolvasztásos elektronsugaras (PBF-EL) eljárások a lézerekhez képest termelékenyebbek, kedvezőbb költségekkel. A porágyolvasztásos (PBF) eljárásokra általánosan jellemző a magas berendezésár és előállítási költség, a relatív alacsony nyomtatási sebesség és a magas minőség.

A poros és huzalos koncentrált energiát használó anyaglerakásos (DED) eljárás változatok esetében a berendezések ára alacsonyabb, mint a porágyolvasztásos (PBF) berendezéseké, még úgy is, hogy az elengedhetetlen szinterezéshez szükséges kemence a gyártó rendszer részét képezi. Jellemzően kisebb bonyolultságú, kisebb költségű és nagyobb darabszámú sorozatok gyártására alkalmas eljárások. A gyártási sebesség egy-egy darab esetén magasabb, mint a porágyolvasztásos (PBF) eljárással készült darab gyártási sebessége.

Az anyagkilövelléses (MJ) és kötőanyag kilövelléses (BJ) eljárások gyártó rendszereinek költsége hasonló a porágyolvasztásos (PBF) berendezésekéhez. Viszont ezen eljárásokkal egyszerűbb alkatrészek nagy darabszámban alacsonyabb költséggel állíthatók elő. Elemzők komolyabb felfutást jósolnak ezen eljárásoknak az elkövetkező években a légijármű, űrpar, gépjárműipari területén.

6. Az additív gyártás szoftverei

Az additív gyártás lényeges elemei a különböző tervező, szimulációs, adatfeldolgozó, előkészítő, ellenőrző, folyamat irányító és az adat biztonsággal kapcsolatos szoftverek, amelyek fejlesztői a 17. ábrán láthatók és ezek az AM éves forgalmának 13,4%-át képezik.



17. ábra

Az AM piac szoftver fejlesztői. Forrás: AMFG

Egy átlagos projekt esetében, a CAD modelltől a kész termékig tartó folyamatban a munka kb. 75%-át maga a nyomtatás teszi ki. Ebből adódóan a tesztek, prototípusok elkészítése, illetve a selejtek hatalmas többlet költséget jelentenek. Különösen igaz ez a fémnyomtatás esetében, ahol a komplex darabok átlagban 15%-a lesz hibás. Ebből kifolyólag különösen fontos a jó tervező program és a szimuláció – a gyártani kívánt darabok virtuális prototípusai sokat segíthetnek a nyomtatás előkészítésében és csökkenthetik a hibás termékek számát. A additív gyártás sorozattermelésbe való integrálásánál pedig kulcsfontosságú a mesterséges intelligenciával támogatott gyártás végrehajtási rendszer az úgynevezett MES (Manufacturing Execution Systems) szoftverek szerepe.

6.1 Tervező szoftverek

A jelenlegi tervezési megközelítések ahhoz, hogy az AM gazdaságilag életképes legyen megváltoztak. A cél érdekében nagyon optimalizált tervekre van szükség, amelyek olykor nagy kihívást jelentenek. A tervezési szoftvereknél három hálózati megközelítést alkalmaznak: az alulról felfelé, a fentről lefelé és vegyes.

Az alulról felfelé (bottom - up) irányuló megközelítés egységcellákon (rácsokon) alapul, amelyeket minden irányban egyenletesen megismételnek. Minél sűrűbb ez az egységgrács annál finomabb felbontás érhető el, ami nagy számítástechnikai időt és kapacitást igényel.

A Fentről lefele (top-down) megközelítés a folytonosság és a diszkrét domének topológiai optimalizálásán (TO) alapszik.

Vegyes megközelítés, amely az előzőek kombinációja. Az egységcellák egyenletes eloszlása helyett többlépcsős algoritmust lehet használni, ahol a topológia optimalizálásból származó sűrűségek határozzák meg az egységcellának nagyságát.

Az alulról felfelé építkező megközelítések tartalmaznak egy integrált szoftvert, amely a felhasználót a tervezési folyamat kezdetétől a végéig irányítja. Ilyenek pl. a Netfabb (Autodesk), a Creo 4.0 (PTC), a Meshup (Uformia) és a Magics (Materialize) szoftvercsomagok. Ugyanígy a top-down megközelítések olyan szoftvert használnak, amely ötvözi a topológiai optimalizálási (TO) módszereket a tervező eszközökkel.

6.2 Szimuláció és gyártás szoftverek

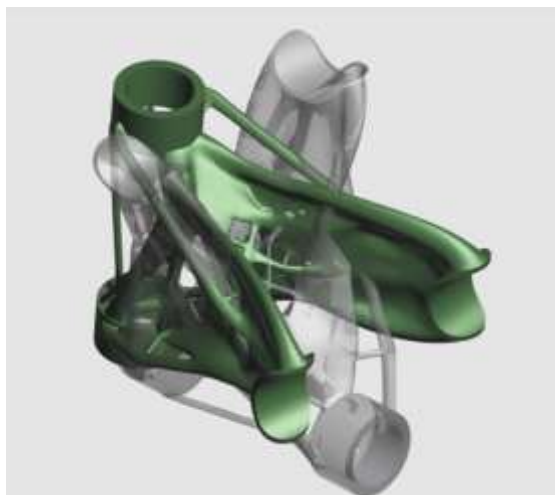
A korszerű szimulációs programok olyan megoldásokat kínálnak, amelyek célja az, hogy már az első valós nyomtatásnál jó alkatrész készüljön. Ezek a komplex program csomagok az építkezési orientációk optimalizálására, a bionikus struktúra tervezésre, a támaszok optimális előállítására és az alkatrészek előzetes deformálására, valamint a feldolgozás során fellépő belső feszültségek kompenzálására használt szoftverekkel, kevés iterációval vagy további iteráció nélkül oldják meg a nyomtatás előkészítését. A legújabb szimulációs szoftverek használata jelentősen csökkenti az „alkatrész jellemzése” elnevezésű folyamatot, ahol a terveket és a gépeket úgy állítják be, hogy következetes és kiszámítható eredményeket érjenek el. Szoftver nélkül az alkalmazástól függően az alkatrész jellemzése jelentős mérnöki munkát igénylő, hetektől hónapokig tartható tevékenység lenne.

Az utóbbi években az additív gyártás szoftverfejlesztői olyan komplex programcsomagokat dobtak a piacra, amelyek több szakaszban végzik a gyártás előkészítését és végül a gyártás levezénylését.

Az első az *értékelés*. Ebben a szakaszban a program az összes lehetséges orientációból a gazdasági, fizikai szempontokat és a tervezés korlátait figyelembe véve meghatározza az optimális orientációt, az építési időt, az anyagfelhasználást, az akadálymentes hozzáférést, az utómegmunkálást és a torzítás érzékenységet a 3D modell összes felépítésének orientációjára. (18.ábra.) [10]

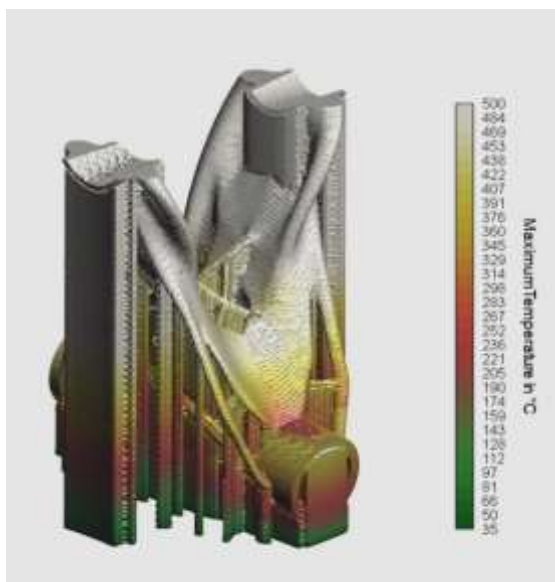
A következő a *szimuláció* szakasza amelyben az alapanyag tulajdonságait és az adott munkaállomás hardver információit figyelembe véve a program kiszámolja az alkatrészben a bevitt hő hatására a gyártás során ébredő feszültségeket és torzulásokat. (19.ábra) [10]

Az adaptáció szakaszban a program meghatározza a levágási sebességet, a pásztázási vektort, valamint a geometriát figyelembe véve optimalizálja a hőbevitelt, a termikus stabilitást és a feszültség felhalmozódást. Ezek után a program kompenzált geometria generálást hajt végre. A szoftver úgy módosítja a geometriát, hogy a gyártás során keletkező torzulások a gyártás végén a geometriai tűréshatárokon belül tartsák a kész darabot. Ha ezek elkészültek, akkor a program a meghatározott optimalizált orientációval és paraméterekkel levezényeli a darab gyártását. [10]



18. ábra

Az optimális orientáció meghatározása. Forrás: Additiveworks



19. ábra

A termikus stabilitás meghatározása. Forrás: Additiveworks

6.3. In-situ monitorozás

Az egyik fontos lépés az állandó minőség biztosításában a lehető legtöbb adat összegyűjtése, amely betekintést nyújthat a 3D nyomtatási folyamatba. Egyes hardvergyártók már lehetővé teszik az AM felhasználók számára az adatok gyűjtését azáltal, hogy 3D nyomtatási rendszereket érzékelőkkel szerelnek fel, hogy lehetővé tegyék a folyamaton belüli megfigyelést és ellenőrzést. A 3D nyomtató belsejébe helyezett érzékelők és kamerák adatait egy speciális szoftver dolgozza fel, amely valós időben méri és elemzi az építkezés több aspektusát, segítve az építkezési folyamat dokumentálását és a követelmények teljesítését. Így azonosíthatók azok a lehetséges problémák, amelyek kívülről a kész darabon nem láthatók. Az olyan termékek, mint a Sigma Labs PrintRite3D®, szoftverek az adott hardverekhez adaptálva a 3D-s alkatrészek építés közbeni megfigyelését teszik lehetővé.

Néhány 3D nyomtatási platform felhasználja az in-situ megfigyelést a következő lépésre a nyomtatási folyamatba történő beavatkozásra. Ha a gyártási folyamat végrehajtása során a megfigyelt réteg nem az előrejelzések szerint viselkedett a gyártási paraméterek korrigálására kerül sor. Ez csökkenti a hulladékot és javítja az alkatrészek minőségét. Az in-situ megfigyelés átalakította több fém AM gyártó technológiáját, amelyeknél nemcsak nyomtatási visszajelzéseket szolgáltatnak, hanem adatvezérelt fejlesztéseket és paraméterfrissítéseket végeznek az automatikus visszajelző rendszerek segítségével. Több gyártónál ezen rendszerek tesztelése zajlik.

6.4. Együttműködés, kutatás és fejlesztés

Egyedül a nagyoknak sem megy. Ahhoz, hogy az fém AM a digitális sorozatgyártás új szintjére lépjen összefogásra, együttműködésre van szükség. A nagy gépjárműgyártók partnerségeket alakítottak ki az alapanyag, AM hardver és szoftvergyártókkal az alkatrészek sorozatgyártására összpontosítva, tekintettel az értékre, amelyet az AM integrálása a folyamatokba mutat. Végül, a Siemens, az Autodesk, a Dassault Systemes, a Materialize és még sok más új generációs szoftverei most már lehetővé teszik az optimalizált alkatrész-tervezést az AM és az AM integrálására a teljes gyártási munkafolyamatba. Támogatják a fejlett CAM (számítógépes gyártás), a CAE (számítógépes tervezés), az AM folyamatszimulációt és az AM folyamatfigyelő eszközöket.

6.5. Az additív gyártás végrehajtási rendszer (MES)

A fém AM igényeinek kielégítésére szolgáló szoftvermegoldások létrehozása kulcsfontosságú lehetőséget nyújt a technológia integrálására a termelési környezetbe. A méretezhető gyártás 3D nyomtatással való megvalósítása gyakorlatilag lehetetlen egy teljes körű irányítási rendszer nélkül. A munkafolyamatok kezelése és irányítása MES (Manufacturing Execution System) szoftverek alkalmazását igényli. A fém AM igényeit szem előtt tartva kifejlesztett MES szoftvermegoldások hozzájárulhatnak egy olyan környezet létrehozásához, ahol az AM munkafolyamat különböző szakaszai össze vannak kapcsolva egy digitalizált Mesterséges Intelligenciát használó AM folyamatirányítási felügyelettel. (20. ábra.)



20. ábra.
az adatok és a MES kulcsfontosságú szerepe Forrás :AMFG

Az adatok begyűjtése, értelmezése, feldolgozása, nyomon követhetősége, visszacsatolása és tárolása kulcsfontosságú szerepet játszik a fém 3D nyomtatás megismételhetőségében és a folyamatok javításában. A MES szoftver integrálása kritikus lépés a 3D nyomtatás útjában, és fontossága a technológiai iparosodás következtében egyre gyorsabban növekszik. [11]

Alapvetően egy additív gyártási végrehajtási rendszer támogatja az AM gyártással kapcsolatos összes valós idejű folyamat kezelését, felügyeletét és automatizálását. Ez magában foglalja a gyártási munkafolyamat összes szakaszát, például a megrendelést, az ütemezést és a minőségbiztosítási menedzsmentet. Egy robusztus additive MES megoldás képes az AM gyártási adatok valós időben történő nyomon követésére és dokumentálására. Ez magában foglalhatja például az előállítási

költségeket, az anyagfelhasználást és a megrendelések átfutási idejét a nagyobb folyamatszabályozás, a jobb döntéshozatal megkönnyítése és a hatékonyság maximalizálása érdekében.

Az additív MES kihívásai:

a. Érték teremtés

Az additív gyártásba történő befektetéséből származó érték levétele a gyártók számára kiemelt prioritás. Ami a gyártási technológiát illeti, az érték két kulcsfontosságú módon érhető el:

- a) a költségek csökkentésével
- b) a termelékenység növelésével.

Az additív MES lehetővé teszi a gyártók számára a gyártási költségek csökkentését azáltal, hogy meghatározzák a folyamatok optimalizálásának és a termelékenység növekedésének módjait. Az automatizálás a valós idejű teljesítménykövetéssel párosulva biztosítja az adatokat és a valós idejű elemzéseket, amelyek szükségesek ahhoz, hogy szükség esetén azonnali kiigazításokat hajtsanak végre, és ezáltal csökkentsék a munkaerőköltségeket.



21. ábra.

A MES kihívásai. Forrás: AMFG

b. Szabványosítás

A gyártás és az üzemeltetési folyamatok egységesítése elengedhetetlen a sikerhez. A több telephelyről és több helyszínen működő gyártók számára a szabványosított eljárások gazdaságos méretet és jelentős költségmegtakarítást kínálnak. Az AM folyamatok globális szintű sikeres szabványosítása azonban gyakran könnyebb meghatározni, mint végrehajtani.

c. Kapcsolódás

A kapcsolódás, amelyet néha „digitális menetnek” is neveznek, egy olyan munkafolyamat létrehozásának koncepciójára utal, amely integrált hardver és szoftver rendszerekből áll, amelyek a maximális hatékonyság érdekében képesek kommunikálni egymással. Egyre nagyobb erőfeszítéseket tesznek az additív gyártás összekapcsolhatóságának megteremtésére mind a hardver, mind a szoftver oldalon. Az MES-gyártók arra is törekednek, hogy közvetlenül integrálódjanak az AM-gépekkel és más fizikai rendszerekkel, ami lehetővé teszi a gyártók számára, hogy mélyebb betekintést nyerjenek működésük általános teljesítményébe és javítsák a döntéshozatali folyamatot.

d. Követhetőség

A gyártók számára a nyomon követhetőség létfontosságú a legfontosabb szűk keresztmetszetek azonosításához és a műveletek optimalizálásához. Az additív MES ezeket a problémákat úgy kezeli, hogy nyomon követi és dokumentálja az adatokat a gyártási munkafolyamat során, lehetővé téve az érdekelt felek számára, hogy a folyamat bármely szakaszában hozzáférjenek a legfontosabb információkhoz. Ez lehetővé teszi a csapatok számára, hogy valós időben kövessék nyomon a munkahelyek állapotát, ami viszont lehetővé teszi a termelés tervezésének optimalizálását és végső soron a nagyobb termelékenységet [11]

6.6. A digitális iker és a fém additív gyártás

Ahhoz, hogy a fém additív gyártásban lévő lehetőségeket maximálisan ki tudjuk használni, a teljes folyamat valóság-hű virtuális ábrázolása szükséges. A „digitális iker”, amely leírja a folyamatot a szimulált tartományban, felgyorsítja a gyártási folyamat tervezését, optimalizálását és vezérlését. A digitális iker egy valós objektum, folyamat vagy rendszer digitális modellje. Fontos szempont, hogy ez nem egy elkülönített virtuális modell. A digitális iker úgy van kialakítva, hogy kétirányú információcserét folytasson a fizikai partnerével. Információt, adatokat adon és fogadon olyan érzékelőktől, amelyek figyelik a teljesítménymutatókat. A cél az, hogy a digitális iker idővel tovább finomodjon, javuljon, addig amíg az a valódi visszatükröződésévé nem válik, hogy a virtuális modell felhasználható legyen fizikai ikre teljesítményének optimalizálására és ellenőrzésére.

A digitális iker és a digitális adatfolyam kulcsszerepet játszik a jövő gyárában. Ennek egy lehetséges megvalósítását a 22. ábra mutatja be.

Az 1. fázis a tervezés, analízis, modellezés és szimulációk fázisa, amely a virtuális térben zajlik. A termék kezdete egyben az additív gyártás digitális menetének (DTAM) a kezdete, ami egy ötlettel indul, amely egy tervben vagy egy meglévő termék szkennelésével ölt virtuális testet, amikor elkészül a digitális iker.

A 2. fázis a gyártás és a monitorozás. Ebben a szakaszban a gyártás előkészítése zajlik. A digitális iker és a gépi adatok felhasználásával gyártás szimulációk készülnek, majd a részletes gyártási terv kerül meghatározásra. A következő lépésben elkezdődik a gyártás és testet ölt a termék. A gyártás fontos része az in-situ monitoring, amely egyben a minőségbiztosítás alapját is adja. A folyamatos visszacsatolás biztosítja a folytonos ellenőrzést és ha szükséges a paraméterek megváltoztatását is. A 2-es fázis utómunkálatokkal és simítással fejeződik be.



22. ábra.

A jövő digitális gyára Forrás: Deloitte Insights

A 3-as a tesztelések és validálás fázisa, amelyben a geometriai méretellenőrzés zajlik és roncsolásmentes vizsgálatokkal győződnek meg arról, hogy a termék a követelményeknek megfelelő-e. Fontos része ennek a szakasznak a vizsgálati eredmények visszacsatolása a digitális ikernek. A digitális ikerhez hozzárendelt adatcsomagnak tartalmaznia kell minden adatot, amely lehetővé teszi a darab reprodukálhatóságát.

A 4-es a csomagolás, szállítás és üzembe helyezés fázisa, amely az alkatrész cseréjéig vagy tönkremeneteléig tart. Ebben a szakaszban is nagyon fontosak az adatok visszacsatolása a terhelésekről, illetve az élettartammal, tönkremenetel okával kapcsolatban a digitális iker számára. A működési adatokat felhasználják a termék folyamatos fejlesztésénél.

Az egész rendszert áthatja egy folyamatos és egyre bővülő adatmennyiség áramlás, amely a tervezési, modellezési, tesztelési, fejlesztési, javítási, minőségbiztosítási, ellenőrzési és validálási információkat tartalmazza.

A prediktív modellezési képességek, amelyek reálisan szimulálják az AM folyamatát és viselkedését, előzetes tudást nyújthatnak az új alkatrész építésének megtervezéséhez és az első mintadarabok elkészítéséhez. Ennek oka az, hogy a modellek, vagy a „digitális iker” képesek lesznek információkat szolgáltatni arról, hogy miként alakul a gyártási folyamat egy adott paraméter-sorozatnál. Ez lehetővé teszi a bemenetek módosítását, ha kiderül, hogy a kívánt eredményeket, például az alkatrész meghatározott minőségét nem éri el. A digitális iker elősegíthetik a folyamat megtartását a meghatározott határokon belül is, mivel a modellek által javasolt optimális útvonaltól való bármilyen eltérést zárt hurkú vezérléssel lehet korrigálni.

7. Fejlesztési irányok

Az additív gyártás meredeken felfelé ívelő fejlődési szakaszban van és nagy jövőt jósolnak neki a szakértők. Az iparág Formnext szakvásárán évről évre egyre növekvő részvétel mellett, bemutatásra kerülnek a legújabb fejlesztések. A teljesség igénye nélkül a legfontosabb fejlesztési irányok a következők:

- új anyagok fejlesztése,
- az additív gyártásra vonatkozó szabványok kidolgozása,
- lézersugár teljesítmény optimalizálás,
- lézersugarak számának növelése,
- lézersugár teljesítményének változtatása a gyártási folyamat alatt,
- folyamatvezérlés fejlesztése,
- a nyomtatási paraméterek skálázhatósága,
- a darabok topológiai optimalizálása,
- adott gyártási térfogatban elhelyezhető darabszámok növelése,
- támaszok mennyiségének csökkentése,
- utómunkálatok csökkentése,
- por eltávolítás és újrahasznosítás automatizálása,
- anizotrópiai problémák megoldása,
- nyomtatási térfogat növelése,
- termelékenység növelése,
- megbízhatóság növelése,
- ismételhetőség, nyomon követhetőség biztosítása,
- tervező, mechanikai, termikus terheléseket szimuláló szoftverek fejlesztése,
- folyamat-monitorozás, rendszerszenzorokkal,
- szériatermelés automatizálása, robotizálása,
- az olvadákfürdő monitorozása,
- valós idejű 2D és 3D információk gyűjtése a nyomtatásról,
- roncsolásmentes vizsgálati módszerek örvényáramos, UH és ipari CT fejlesztése,

- minden réteg real-time ellenőrzése
- infravörös hőmérséklet-szenzor (1090- 1700 nm) alkalmazása,
- plazmaszenzor (700- 1040 nm) alkalmazása,
- lézersugár monitorozás (teljesítmény-szenzor),
- hibrid (3D nyomtatás és forgácsoló) berendezések fejlesztése,
- huzaladagolású eljárásváltozatok fejlesztése,
- energiahatékonyság növelése és az ökológiai lábnyom csökkentése.

A fenti felsorolás messze nem teljes, de ebből is látható, hogy számos területen folynak fejlesztések. A fém AM-et illetően elmondható, hogy a fejlesztések valódi multidiszciplináris, nagyon sok szakembert foglalkoztató tevékenységek, amelyeknél egyre fontosabb szerepet kap a minél szélesebb együttműködés.

8. Additív gyártás sikertörténetek

8.1. GE LEAP hajtómű üzemanyag befecskendező fúvóka

A General Electric által 2012-ben kezdték kifejleszteni majd az engedélyeztetési eljárások után 2015 óta sorozatban készülő CFM 56 LEAP hajtómű üzemanyag befecskendezője egy igazi AM sikertörténet. A GE Aviationnál 2018- októberében készült el a 30.000 –ik fúvóka. Egy turbinában 12 db. fúvóka kerül beépítésre, azaz eddig 2500 CFM56 LEAP turbina már új fúvókákkal készült. A turbinagyártó CFM International-nek amelynek 50/50%-os tulajdonosa a GE Aviation (USA) és a Safran Aircraft Engines (Franciaország) több mint 16.000 db. LEAP hajtóműre volt megrendelése 2019-ben. (23. ábra), [12]



23. ábra

GE LEAP fúvóka és CFM 56 LEAP hajtómű Forrás: GE

8.2. Siemens úton a digitális gyártás felé

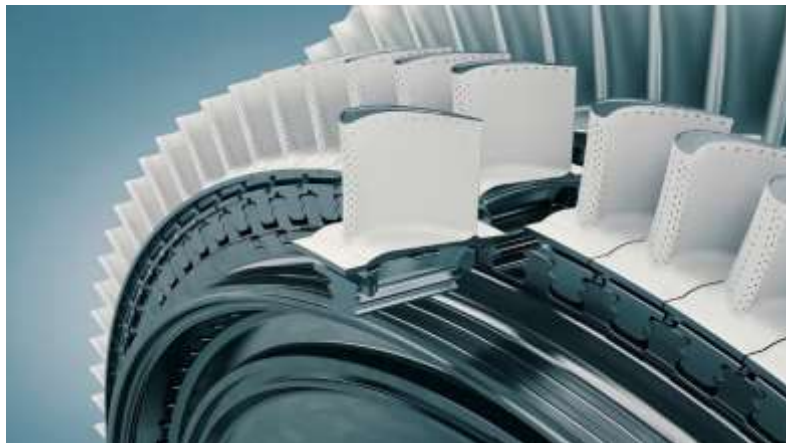
A Siemens 2009-től foglalkozik a fém additív gyártás bevezetésével és alkalmazásával. Először csak gázturbina égők pótalkatrészek gyártását, később magát az égőket készítették el porágyas technológiával. A Siemens AM fejlesztő csapata belátta, hogy a kiváló minőségű alkatrészeket sorozatban történő előállításához erős szoftver alapokkal megtámogatott és jól definiált folyamatot igényel. A prototípus gyártástól a sorozatgyártás szintjére történő fejlesztés számos beruházás mellett a szemléletmód változást is megkövetelte. A Siemens NX CAD, CAM és CAE megoldásokat nemcsak a tervezési és gyártási folyamatban használták, hanem az alkatrészek és a folyamatok adatainak kezelésére is. Ez elősegítette a folyamat kibővülését és alkalmazkodását a létesítmény igényeinek növekedésével. A Siemens Finzpäng-i létesítményében a digitális iker alkalmazásával valódi digitális gyártást építettek fel, amely tartalmazza a tervezés és gyártási folyamat minden elemét a virtuális terméktől a gyártás kivitelezés és a végtermék ellenőrzéséig. (24. ábra.) Ma a Siemens Finzpängi létesítmény 2600 dolgozójának fele az AM területén tevékenykedik. [13]



24. ábra

Digitális gyártás a virtuális terméktől a valós termékig Forrás: Siemens

Az új alapokon működő digitális AM gyártórendszeren a 2017 –ben készült el egy forradalmian új turbina lapát (25. ábra) amelynek generatív tervezése, szimulációja, a gyártási technológia elkészítés és kivitelezése 2 hónap volt. Ez közel 90%-kal rövidebb, mint ha a hagyományos szubsztraktív technológiákkal készült volna a turbinalapát. Az új turbinalapátokat a Siemens egy SGT-400 típusú, 13 MW-os ipari gázturbinájába, 13.000-es fordulatszámmal, 1250 °C-os üzemi hőmérsékleten tesztelték. A lapát belső hűtését az AM technológiának köszönhető különleges csatornarendszeren áramló 400 °C-os levegő biztosította. A teljes terhelésű sikeres tesztek befejezését követően validálták az új terméket. [14]



25. ábra

Porágyolvasztásos technológiával készül turbina lapát. Forrás: Siemens

8.3 Relativity Space –az első autonóm digitális rakétagyártó

A 2015-ben alapított és 2016-ban indult start up vállalkozás ma már egy 230 fős cég, amely valószínű forradalmat valósít meg hordozórakéta gyártásban. A cég megálmodói és munkatársai a *lézersugaras porágyolvasztásos (PBF)* eljárás változattal, *lézersugaras additív gyártás (LMD)* és *huzaladagolású védőgázos ívhegesztéses additív gyártás (WAAM)* eljárások alkalmazásával egyszerűsítették, felgyorsították, költséghatékonyá és rugalmassá tették a gyártást. 2018-ban adták át a három robotkaros lézerforrással és hegesztő áramforrásokkal is működtethető munkaállomást amely első sorban alumínium additív gyártására használnak (26.ábra). Egy a második fokozatban alkalmazott üzemenyagtartály legyártása kb. 20 napot vesz igénybe. Ma ott tartanak, hogy a saját fejlesztésű alapanyagokból, alkatrészekből, hajtóművekkel és fokozatokból összeszerelt, az indításra kész rakétáig a gyártási ideje 60 nap. A 27. ábrán az összeszerelésre váró fokozatok láthatók. [15]

A Stargate 3 darab 6 tengelyű robotja Ø 2,2 m x 2,7 m magas alkatrész nyomtatását teszi lehetővé. 2018-ban a világ legnagyobb 3D nyomtatójaként vált ismertté. A 2020-ban átadott új csarnokban felállított szülő robotos munkaállomások Ø 3,3 m x 7,5 m magas alkatrész gyártását teszik lehetővé (28.ábra.). [14]



26.ábra.

Stargate bal oldalt a kész üzemanyag tartály hajtóművel, jobb oldalt a 3 robotos munkaállomás



27.ábra.

Összeszerelésre váró fokozatok Forrás. Relativity

A tradicionális rakétagyártás jellemzően nagy infrastruktúrát, rögzített drága szerszámokat alkalmaz, továbbá 100.000 db feletti alkatrészszám, hosszú 24 hónapos gyártási idő valamint 48 hónapos újra tervezési idő, bonyolult ellátási lánc és komplex szervezés jellemző rá. Ehhez képest az autonóm digitális gyártás könnyen adaptálható, digitális, autonóm robottechnikát alkalmaz. Jellemző rá a gyors, 2 hónapos gyártási idő, 6 hónapos újratervezési idő, egyszerű ellátási lánc és a szoftver vezérelt gyártás. [15]



28. ábra.

az új csarnok robotállomása

A Stargate gyár vertikálisan integrálja a robotikát, a szoftvereket és a szabadalmaztatott 3D nyomtatási technológiákat a gyártás digitalizálása érdekében. Ez a technológia lehetővé teszi, hogy a *Terran 1* hordozórakéta felépítése és *Aeon 1* típusú hajtóművek 3D nyomtatással történő előállításának következtében 100-szorosára csökkent az alkatrészek száma, jelentősen csökkentve az szerelési pontokat és az átfutási időket, egyszerűsítve az ellátási láncot és az általános megbízhatóságát pedig megnövelje.

A Relativity Space autonóm rakétagyártás jellemzői:

- A küldetés szempontjából kritikus szerkezeti követelmények kielégítésére tervezett nagy szilárdságú szabadalmaztatott alapanyagok.
- Házon belüli anyagvizsgáló laboratórium az új alapanyagok fejlesztéséhez
- Nulla fix szerszám és radikális alkatrészszerelés csökkentés
- Gyorsabb tervezési ismétlések és alkatrész-optimalizációk
- Valós idejű minőség-ellenőrzés és alkatrész-ellenőrzés
- Érzékelő és elemzés által vezérelt gépi tanulás
- Intelligens adatközpontú gyártás
- Gépi tanulás vezérlő algoritmusok használata
- Komplex geometriát lehetővé tevő együttműködő additív és szubsztaktív technológiák alkalmazása
- Együttműködő robotika és megmunkálási út tervezés
- A gyártás során rögzített ellenőrzési és validálási adatok
- Rugalmas és jól skálázható rendszerarchitektúra
- Felhőalapú gyártási szimuláció és képzés



29.ábra.

Szerelésre előkészített fokozatok az új gyártó csarnokban látványterv Forrás: Relativity

A Relativity új digitális gyárában (29.ábra) a saját fejlesztésű nikkel ötvözetből LMD eljárással készült AEON 1-es hajtómű és különleges alumínium ötvözetből gyártott Terran 1-es hordozó rakéta 95%-ban additív technológiákkal készül. Az első űrrepülőgépgyár, amely az adatközpontú tanulást alkalmazta a rakétagyártás minden aspektusának javítása érdekében. [15]

9. Összefoglalás

Az előadásban foglalkoztunk az additív gyártás helyzetével a világban, bemutatásra kerültek az additív piac szereplői, forgalmi adatok, statisztikák, fejlődési előrejelzések, a fém additív gyártás, valamint az alapanyagok és gyártásuk aktualitásai. Bemutattuk a hagyományos szubsztraktív eljárásokkal készülő termékek előállítási költségeinek összehasonlítását, az AM eljárásokkal készült termékek előállítási költségeit. Áttekintettük az AM technológiákat ezek sajátosságait. Az AM eljárások sorozatgyártásba való alkalmazhatóságát nézve összevetettük a gyártási költségeket, a darabok minőségét, és a termelékenységet. Ízelítőt kaptunk a 3D nyomtatáshoz használatos tervezési, szimulációs és üzemeltetési szoftverek, valamint a minőségbiztosítás és a folyamat irányítás világából. Foglalkoztunk a digitális iker koncepcióval és összefoglaltuk a legfontosabb fejlesztési irányokat. Végezetül a rendszerszintű digitális gyártás megvalósításának lehetséges változatait három sikertörténetben mutattuk be.

A fém AM elindult a digitális sorozatgyártás bevezetése és megvalósítása felé. Megállapítható, hogy nagyon sok kihívás és feladat vár még a tudósokra, szakemberekre. A jövőben felértékelődik az együttműködés és a bizalom szerepe. Az egyre nagyobb multidiszciplináris összefogásnak és kooperációnak köszönhetően biztató eredmények születtek, amelyek kellő önbizalmat adnak a tovább lépésekhez azon az úton, amely a jövő digitális gyárának megvalósításához vezet.

Irodalomjegyzék

- [1] The Additive Manufacturing Landscape 2019 – Essential insightw into te additive manufacturing martket, key trends and analyses – AMFG
- [2] 3D printig trend 2020 –Industry highlights and market trends - 3D HUB Trend report page 16.
- [3] AMPOWER report 2020 - Metal Additive Manufacturing management summary, page 10
- [4] This is how much additive manufacturing is worth in the 20 global AM markets – David Sher Jan 5 2020-
<https://www.3dprintingmedia.network/the-top-20-global-am-markets/>
- [5] AMPOWER report 2020 -<https://www.am-power.de>

- [6] Understanding metal powder requirements for Additive Manufacturing: Views from the industry – J. E. Barnes; F. Francqui; R. Dehoff – Metal AM Vol. 5 No 3 p. 175-182.
- [7] Új dimenzióban az additív gyártás – Halász G.- Gyártástrend 2017-12-12-
http://gyartastrend.hu/gyartastechnologia/cikk/uj_dimenziokban_az_additiv_gyartas
- [8] Advancements in metal 3D printing Beyond powder bed – Additive manufacturing on the brink of industrialization _ Roland Berger Focus – October 2018
- [9] Binder Jetting and FDM: A comparison with Laser Powder Bed Fusion and Metal Injection Moulding- M. Munsch ; M. Schidt-Lehr; E. Wycisk - Metal AM 2018 Vol 4 No3 p. 159-167
- [10] Amphyon 2019 - Additive Manufacturing Software Solution of Tomorrow- Additive Works www.additiveworks.com
- [11] Additive Manufacturing MES Software: The essential guide – February 2020 Whitepaper AMFG - page 6
- [12] Poliamid SLS és fémporos DMLS újdonságok- Falk György VARINEX előadás- Messer Innovációs Fórum 2019 . november 26.
- [13] Digitalisation enables the Industrial solution of Metal AM at Finspång – Aron Frankel; Ashley Eckhoff - Metal AM Autumn vol4 No3 pag 117-126 2018
- [14] Redesigned for Additive Manufacturing Serial production of a new fuel swirler for Siemens gasturbine – Roy Huff; Terry Wohlers Metal AM Vol. 5 No 3 page 167-172
- [15] https://www.youtube.com/watch?v=MEZKQ3K_K_Y&t=1606s Relativity Space webinar;
<https://www.youtube.com/watch?v=R5mhUm6NzqE>
<https://www.relativityspace.com/>;

KÜLÖNBÖZŐ HOZAGANYAGOK HATÁSA A KRISTÁLYOSODÁSI REPEDÉSI ÉRZÉKENYSÉGRE, ALUMÍNÍUM HEGESZTÉSEKOR

THE EFFECTS OF DIFFERENT FILLER MATERIALS ON THE SOLIDIFICATION CRACKING SUSCEPTIBILITY IN THE CASE OF ALUMINUM WELDING

Hirt Péter Varbai Balázs Katula Levente Májlinger Kornél

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és
Technológia Tanszék, 1111 Budapest, XI. Bertalan L. u. 7.

peterhirt@gmail.com varbai@eik.bme.hu

A kutatómunkánk az alumíniumötvözetek kristályosodási repedésével foglalkozik. Alumínium ívhegesztésének esetében a megfelelő hozaganyag alkalmazása nagyon fontos szempont. A hozaganyag alkalmazásának hatására volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztés (TIG) esetében is megváltozik a varratfém kémiai összetétele. Ennek megfelelően a különböző típusú hozaganyagok különböző hatást gyakorolnak a varratfém kristályosodási repedéssel szembeni érzékenységére. Az 1450 típusú tömör TIG pálcá ötvözetlen alumínium TIG hegesztésére ajánlott, de a nagyobb titán (Ti) tartalmának köszönhetően elősegíti a szemcsefinomodást, és így csökkenti a kristályosodási repedéssel szembeni érzékenységet. A további két vizsgált hozaganyag (4043 és 4047 típusú) szilíciummal (Si) ötvözött. A különböző hozaganyagok értékeléséhez Houldcroft-vizsgálatot, más néven halszákapróbát alkalmaztunk. A vizsgálatok során a legelőnyösebb hozaganyagnak a 4047 típusú adódott. Ezen kívül a varratalakot és a mikrokeménységet is összehasonlítottuk a 4043 és 4047 típusú TIG pálcával készült varratok esetében.

Our paper is focusing on the solidification cracking behaviour in the case of arc welding of aluminium alloys. In the case of aluminium arc welding, the usage of proper filler material is essential. Using filler material in case of tungsten inert gas (TIG) welding of aluminium alloys changes the chemical composition of the molten pool, thorough dilution. Thus, in our research, we focused on the influence of different filler materials on the solidification cracking behaviour. For this research, three different types of TIG filler rods were investigated, which were recommended in scientific literature to minimize the solidification cracking susceptibility. The 1450 type TIG rod is recommended for unalloyed aluminium TIG welding, but the higher titanium content promotes grain refinement and thus higher resistivity against solidification cracking. The other two TIG rods (4043 and 4047) are alloyed with silicon (Si). For the evaluation of using different filler materials, Houldcroft, also known as fishbone tests were performed. In our research, it was found that the best results were obtained using the high Si content 4047 TIG rod. Also, the weld geometries, and microhardnesses were compared to the sample, welded with 4043 rod.

1. Az alumínium és ötvözeinek tulajdonságai

Az alumíniumot és ötvözeit, előnyös tulajdonságaik miatt, széles körben alkalmazzák mind háztartási, mind ipari környezetben. Ennek megfelelően hegesztése hazánkban is gyakran kutatott terület [1,2,3,4,5]. Kis sűrűségének (2700 kg/m³) köszönhetően kiválóan alkalmazható a járműiparban. Jól tapadó, tömör felületi oxidrétege miatt a környezeti korrózióval szemben ellenálló, emiatt kültéri szerkezetek, például kerti bútorok, alapanyagaként is kiválóan szolgál. Elektromos vezetőképességének köszönhetően az elektronikai ipar is előszeretettel alkalmazza [6,7]. Mi-vel az alumínium a földkéreg harmadik leggyakrabban előforduló eleme (az oxigén és a szilícium után) energiaigényes előállításának ellenére hosszú távon lehet fel-használásával számolni. A tiszta alumínium ötvöztetésének egyik jelentős célja a szilárdságnak növelése. A növelt szilárdságú alumíniumötvözetek adott esetben már alkalmasak lehetnek az acélok kiváltására is. A fő ötvözők a réz (Cu), a mangán (Mn), a szilícium (Si), a magnézium (Mg) és a cink (Zn) [8]. Ezen ötvözők szerint az alumíniumötvözetek 8 különböző anyagminőségi csoportba sorolhatóak az MSZ EN 573-1:2005 Alumínium és alumíniumötvözetek. Az alakított termékek vegyi összetétele és alakja. 1. rész: Számjelölési rendszer [9] című szabvány alapján.

Az alumíniumötvözetek hegesztése során sok és jelentős probléma léphet fel [10]. Alumínium hegesztésekor (i) az előkészületek során, (ii) a hegesztés közben és (iii) a hegesztési utómunkálatok során is ügyelni kell a technológiai fegyelem betartására. Az alumínium hegesztése során kialakuló legfontosabb problémák a varratfém melegrepedése, a varratfém porozitása, a varrat lágyulása és az oxidréteg feltörése [11,10].

Az alumíniumot és ötvözeit legtöbbször volfrámelektrodás, semleges védőgázos ívhegesztési eljárással (TIG-hegesztés) hegesztik. Leginkább jellemző a 141-es eljárás (MSZ EN ISO 4063:2016 [12] szerint), amely során semleges védőgázt, és hozaganyagként tömör pálcát használunk. A kutatásaim során én is ezt az eljárást alkalmaztam a hegesztési kísérletekhez. A 141-es eljárás során három különböző, 1450-es, 4043-as és 4047-es típusú tömör pálcát használtam a hegesztéshez.

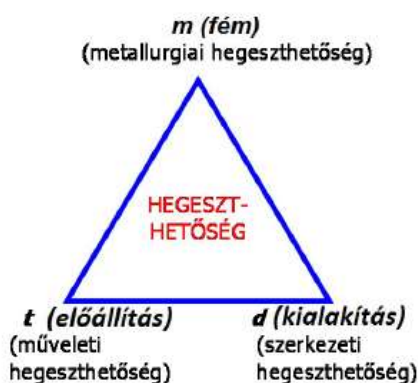
Kísérleteimben MSZ EN ISO 14175:2008 [13] szerint I1 típusú, azaz tiszta argon (Ar) védőgázt használtam.

A kísérletek során az előbb említett hozaganyagok összehasonlítása volt cél, a kristályosodási repedéssel szembeni ellen-állásuk szempontjából.

2. Alumínium ötvözetek hegeszthetősége

A hegeszthetőség sokszor előforduló fogalma a gépészmérnöki terminológiának, mégis nehéz konkrétan definiálni. A hegeszthetőség egy lehetséges definíciója, hogy a kialakított hegesztett varrat és a szerkezet milyen módon felel meg a vele szemben állított elvárásoknak, illetve követelményrendszernek[6].

A hegeszthetőséget ezek alapján három további elemre, a metallurgiai (fémteni), a műveleti és szerkezeti hegeszthetőségre lehet bontani, ahogyan azt az 1. Ábra mutatja.



1. Ábra: A hegeszthetőség elemei
ISO/TR 581:2005(E) és Kristóf Csaba alapján [14]

A kutatásomban elsősorban az alumíniumötvözetek kristályosodási repedésével foglalkoztam, amelyik kialakulását elsősorban a metallurgiai hegeszthetőségi szempontból vizsgáltam.

A kristályosodási repedés a varrat megszilárdulása során jön létre. Kialakulásának oka (i) az anyagban található szennyezők és ötvözők jelenléte, (ii) a kristályosodás morfológiája, valamint (iii) a hegesztés során kialakuló belső húzófeszültségek. Mivel az alumíniumötvözetek ívhegesztése esetén az ötvözők hatására is kialakulhat kristályosodási repedés, ezért ezek repedésmentes hegesztése nehezebb, mint a tiszta alumíniumé [10,15].

A hegesztési hőfolyamat során az alapanyagot megolvasztjuk, majd az ömledékben a kristályosodás során a kevésbé oldódó ötvözők a maradék

folyadékfázisban feldúsulnak, adott esetben eutektikumot képezve. A kristályosodási repedés a kisebb hőmérsékleten megszilárduló eutektikus rétegben, a szemcsehatárok mentén, a fellépő húzófeszültségek miatt jöhet létre [10].

A kristályosodási repedés kialakulásának kockázata akkor a legnagyobb, ha a varrat-fémekben az egyes ötvözőtartalmak a kritikus tartományba esnek (1. Táblázat). Ennek megfelelően a hegesztés során nagyon fontos elkerülni ezeket a tartományokat [10].

1. Táblázat: Az alumíniumötvözetek melegepedés szempontjából kritikus ötvözőtartalmai [10]

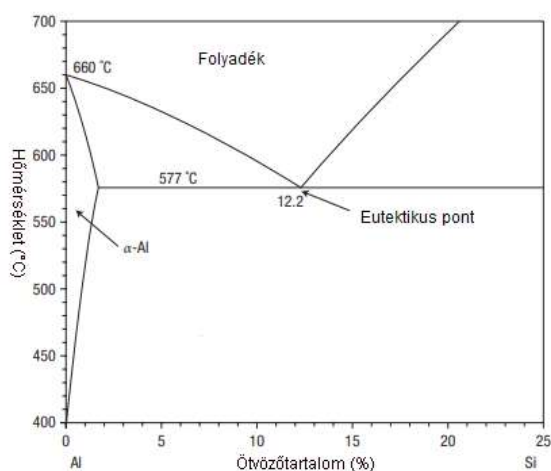
Ötvözet	Kritikus ötvözőtartalom (%)
Al - Si	0,5 – 1,2
Al- Cu	2,0 – 4,0
Al - Mn	1,5 – 2,5
Al - Mg	0,5 – 2,5
Al - Zn	4,0 – 5,0
Al - Fe	1,0 – 1,5
Al - Li	Nincs adat
Al -Ni	Nincs adat

3. A vizsgált hozaganyagok

A kísérletsorozatban három különböző hozaganyagot vizsgáltam, amelyeknek a szakirodalom szerint egyaránt jó a kristályosodási repedés kialakulásával szembeni ellenállása. Mindhárom esetben 2 mm átmérőjű tömör pálcát alkalmaztam.

Az 1450-es alumíniumötvözet titánnal (Ti) ötvözött, amely szemcsefinomító hatása által csökkenti a kristályosodási repedés kialakulásának valószínűségét [10,16].

A 4043-as és a 4047-es hozaganyag Si-ötvözésének köszönhetően csökkenti a kristályosodási repedés kialakulásának kockázatát. A Si ötvözőként növeli az ömledék folyóképességét, emiatt öntészeti alkalmazásokban előszeretettel használnak szilíciummal ötvözött alumínium ötvözeteket. A folyóképesség javulása előnyös a kristályosodási repedés elkerülésének szempontjából is. A megnövelt folyóképesség miatt a hőtágulásból adódó zsugorodás során az ömledék könnyebben feltölti a kristályosodási repedés kialakulása során létrejövő anyaghiányos területeket. Ezenkívül megfelelő (~ 4 - 12 %) Si tartalom mellett a kristályosodási hőköz szűkítése is lehetséges, így kevesebb idő adódik a diffúzióra és a varratfém kevesebb időt tölt ömledék állapotban [17,10].



2. Ábra Al-Si fázisdiagram, 25 % Si-tartalomig [18]

A 4043-as hozaganyag megközelítőleg 4,5-5,5 % szilíciumot tartalmaz. Bár nem csak Si-tartalmú ez az ötvözet, fémtani vi-selkedése az Al-Si egyensúlyi diagram alapján közelíthető. Ahogy a 2. Ábra szemlélteti, ez az Al-Si ötvözet kisebb hőmérsék-leten ($\approx 640\text{ }^{\circ}\text{C}$) szilárdul meg, mint a tiszta alumínium és a megszilárdulási hőköz is aránylag kicsi ($\approx 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) [19]. Ömlesztőhegesztés esetén természetesen figyelembe kell venni a keveredési arányt is, így kis Si-tartalmú alapanyagot hegesztve valamivel kisebb lesz a varratfém Si-tartalma, mint a hozaganyagé.

A 4047-es hozaganyag 11-13 % szilíciumot tartalmaz, így az egyensúlyi fázisdiagramon az eutektikus pont körül helyezkedik el, ezért még kisebb megszilárdulási hőmérséklet és szűkebb dermedési hőköz érhető el vele [20]. Ezen előnye mellett jelentősen növeli a folyóképességet és csökkenti a hegesztés hatására történő vetemedést.

Ezt az ötvözetet eleinte forrasanyagként használták, de kiváló melegrepedéssel szembeni ellenállásának köszönhetően egyre elterjedtebb hegesztési hozaganyagként is [20]. A hozaganyagok összetétele a 2. Táblázatban látható.

2. Táblázat: A felhasznált hozaganyagok összetétele [16,19,20].

Ötvöző (%)	1450	4043	4047
Si	0,25	5,00	11,4
Fe	0,40	0,60	0,17
Mn	0,05	0,05	-
Cu	0,05	0,10	0,05
Ti	0,15	0,15	0,02
Zn	0,07	0,10	-
Mg	0,05	0,05	0,01

4. Különböző hozaganyagok összehasonlítása halszálka próbával

A halszálka próba, más néven Houldcroft-vizsgálat, esetében egy speciálisan kialakított próbatesten végzett hegesztés értékelésével adható meg a hozaganyag relatív melegrepedékenységi mérőszáma, azaz, hogy az adott alapanyag az adott hozaganyaggal hegesztve mennyire érzékeny a melegrepedésre. A vizsgálat menetét az MSZ 4312-2:1978 [21] szabvány írja le, amely a TIG-hegesztési eljárásra vonatkozik.

A vizsgálatot két különböző anyagminőség hegesztéshez végeztem el. Először egy 2 mm vastagságú 1000-es csoportba tartozó (99,7 % alumíniumot tartalmazó) alumínium ötvözetten. Az alapanyagból a 3. a) Ábrán látható szabványos módon kialakított próbatesteket munkáltam ki fémfűrészsel.

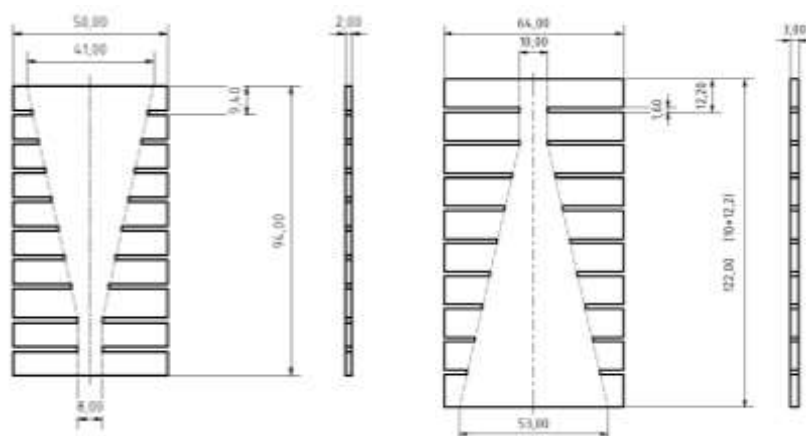
Ennél a vizsgálatnál kézzel készítettem a hegesztéseket. Előtétlemezt alkalmaztam, azonban a megfogást nem tudtam az MSZ 4312-2:1978 szabványnak megfelelően kialakítani. A hegesztések során a próbadarabok végét szorítottam csak le.

Ehhez az alapanyaghoz az 1450-es, a 4043-as és 4047-es hozaganyag is ajánlott, így mindhármat vizsgáltam.

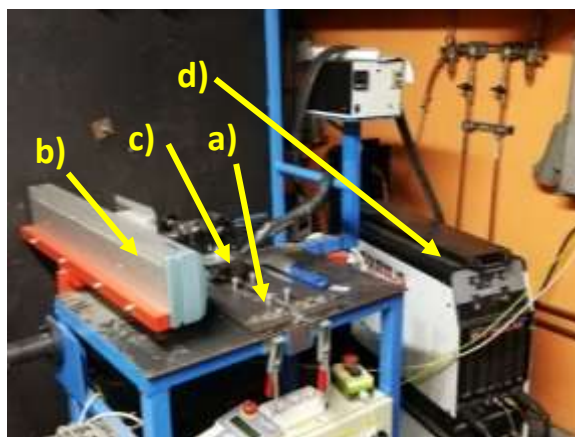
A második vizsgálatot 6082 T6-os alumínium ötvözetten végeztem. Az vizsgálathoz vízzel vágott 3 mm vastag próbadarabok álltak rendelkezésre. A darabok alakja és méretei a 3. b) ábrán láthatóak. A

próbadarabokat az MSZ 4312-2:1978 szabványnak megfelelően előtétlemezzről indulva hegesztettem és 4 pontban fogtam meg. A vizsgálati berendezést az 4. Ábra mutatja be.

A 6082-es alumíniumötvözet (AlSi1MgMn, Si = 0,7-1,4 %-ot, mangánból 0,4-1 %-ot és magnéziumból 0,6-1,2 %-ot tartalmaz [22]) a kiválóan keményíthető ötvözetek csoportjába tartozik, ennek megfelelően szerkezeti anyagként célszerűen a kiválóan keményített állapotában alkalmazandó. A legkedvezőbb mechanikai tulajdonságokat a T6-os hőkezeltségi állapotban lehet elérni: $R_{p0,2} = 250$ MPa, $R_m = 300$ MPa [23]. A T6-os hőkezeltségi állapot eléréséhez a hőkezelés folyamata során 535 °C-ra kell az ötvözetet felmelegíteni, majd hirtelen, vízben lehűteni (a hűtőközeg hőmérséklete nem haladhatja meg a 40 °C-t). Ezután mesterséges öregítés következik, mely 160-170 °C körül elvégzendő [24].



3. Ábra: a) A 2 mm vastag halszálla próbatest elméleti kialakítása, b) A 3 mm vastag halszálla próbatest elméleti kialakítása



4. Ábra: A hegesztőberendezés: a) a próbadarabot leszorító asztal, b) a lineáris hegesztőautomata, c) hegesztőpisztoly és annak befogása, d) a hegesztőgép.

A hegesztések elvégzéséhez ebben a kísérletben egy az 4. Ábrán látható hegesztő automatát használtam, így a hegesztési sebességet a kísérlet során végig állandóan tudtam tartani.

A 6082-es alapanyag hegesztésére az 1450-es hozaganyag nem ajánlott, ehhez az anyagminőséghez általában 4000-es ötvözeteket alkalmaznak. Ennek megfelelően ebben az esetben csak a 4043-as és 4047-es hozaganyagokat hasonlítottam össze.

5. Az 1000-es csoportba tartozó tiszta alumínium hegesztése és az eredmények kiértékelése

A 'tiszta' alumínium hegesztése során az áramforrás egységesen 61 A áramerősségre volt állítva, elektródaként pedig 1,6 mm átmérőjű, szürke színnel jelölt WC20 típusú (0,2 % cérium-oxiddal adalékolt) elektródát használtam. A hegesztési sebességeket mindhárom próbatest esetében azonosan tartottam; az átlagos hőbevitel a 4043-as hozaganyag esetében 0,20 kJ/mm, míg az 1450-es és 4047-es hozaganyagoknál 0,21 kJ/mm volt.

A hegesztések elvégzése után az elkészített varratokon a kialakult repedések hosszát mértem. Ezt a vonatkozó szabvány szerint szemrevételezéssel kell elvégezni, legalább 0,5 mm pontossággal. A megfelelő pontosság elérésének érdekében sztereomikroszkóp segítségével mértem meg a repedéshosszakat az Olympus SZX16 Stream szoftvert használva.

A repedéshosszt a darab mindkét oldalán meg kell mérni, a próbadarabhoz tartozó repedéshosszt (l) az alsó (l_a) és a felső (l_f) oldalhoz tartozó lement értékek számtani közepeként kaphatjuk meg.

$$l = \frac{l_a + l_f}{2} \quad (1)$$

A három vizsgált hozaganyag (1450, 4043, 4047) esetében, a repedéshosszakat az 5. Ábrán ábrázoltam. A hozaganyagoként készített 8 varratból ki kell zárni azt a kettőt, amelyiken a legnagyobb, illetve a legkisebb repedéshossz adódott, ezeket piros színnel jelöltem. A számításba vett repedéshosszak átlagát zöld vonallal jelöltem. Látható, hogy a 4043-as hozaganyag esetében a leghosszabbak a mért eredmények, az 1450-es és a 4047-es hozaganyaggal készültek esetében hasonló repedéshosszak adódtak.

Az átlagos repedéshossz az 1450-es hozaganyagnál 6,2 mm, a 4043-nál 7,7 mm és a 4047-nél 5,3 volt.

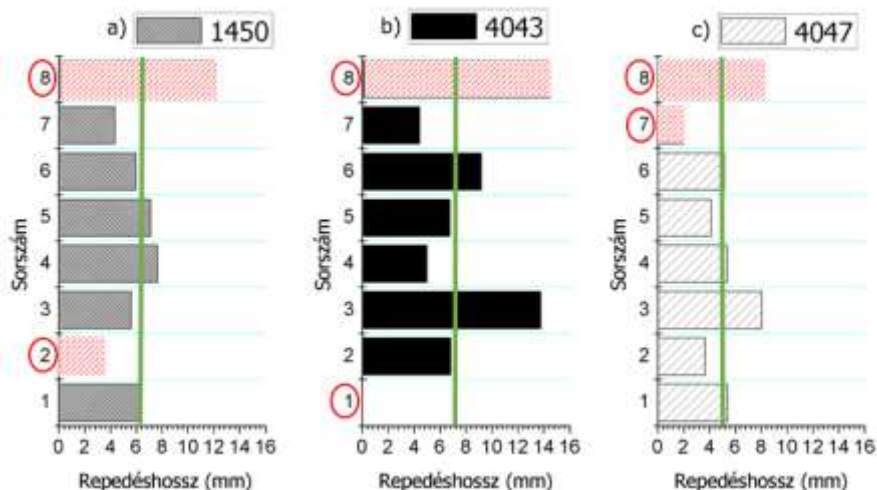
A repedéshosszak segítségével meghatározható a relatív repedésérzékenységi mérőszám (A_r), amely segítségével sorrendbe rendezhetőek a hozaganyagok:

$$A_r = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{L_i} \cdot 100 \quad (2)$$

l : a mért repedéshossz

L : a hegesztett varrat hossza

Az elvárásoknak megfelelően a nagy Si tartalmú (11 - 13 %) 4047-es próbadarabnál adódott a legkisebb A_r érték ($A_r = 37$ %), tehát ezzel a hozaganyaggal hegesztett próbadaraboknak a legjobb a kristályosodási repedéssel szembeni ellenállása. A második legjobb az 1450-es hozaganyag lett ($A_r = 43$ %), mert erre a helyre inkább a 4043-as (Si = 4,5 – 5,5 %) pálcát vártam, amely a három közül a legrosszabbnak adódott ($A_r = 53$ %).



5. Ábra: A három különböző hozaganyaggal készült próbadarabokon mért repedéshosszak (a):1450, b):4043, c):4047)

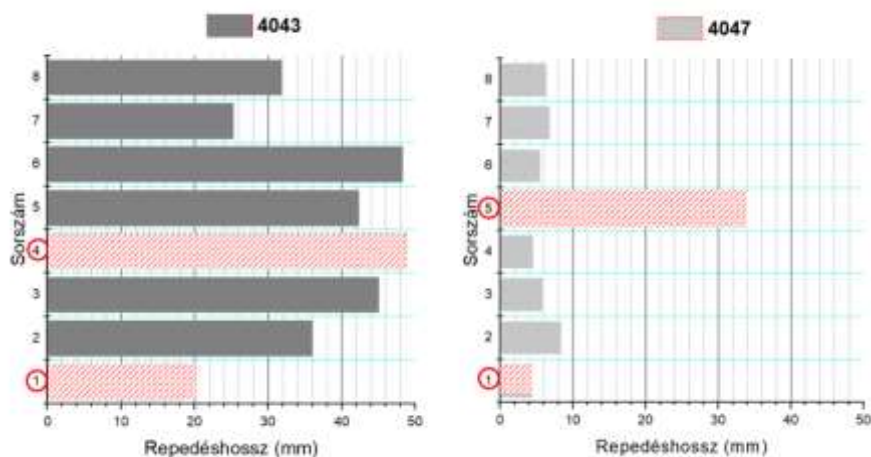
6. A 6082-es Alumíniumötvözet hegesztése és az eredmények kiértékelése

A 6082-es alapanyag T6-os hőkezeltégi állapotát keménységméréssel ellenőriztem. A méréseket egy 1 mm átmérőjű, 100 kp-os HRB keménységmérő géppel végeztem. A mért értékek 55 és 60 HRB között voltak, amely összehasonlító táblázatok alapján megfelel a 300 MPa szakítószilárdságnak.

A hőbevitel a hegesztő automata állandó sebességének köszönhetően a hegesztés során állandó, 0,44 kJ/mm volt. A hegesztési áram 150 A, a feszültség 14 V volt. Az elektróda ezen kísérleteknél is 2,4 mm átmérőjű WC20 volfrámelektroda volt.

A repdeshosszakat és a melegrepedékenységi mérőszámokat az 1. és 2. képlet segítségével tudtam meghatározni. A repedéshosszakat a 6082-es alumíniumötvözet TIG-hegesztése esetén a 6. Ábra mutatja be.

A 6. Ábrából látható, hogy a 4047-es hozaganyagnak jelentősen jobb a kristályosodási repedéssel szembeni ellenállása, mint a 4043-nak. Ennek megfelelően a relatív repedésérzékenységi mérőszám (A_r), 2. képlet, az előbbinél 37 %-nak, az utóbbinál 234 %-nak adódott.



6. Ábra: A 6082-es alumínium ötvözetből készült halszálla próbatesteken mért repedéshosszak a 4043-as és 4047-es hozaganyagok esetén

7. Keménységértékek összehasonlítása

A kiválóan keményíthető alumínium ötvözeteknél, mint amilyen a 6082-es ötvözet is, a hegesztés során a varratfémbe és a hőhatásövezetbe az anyag lágyulása fordulhat elő [25].

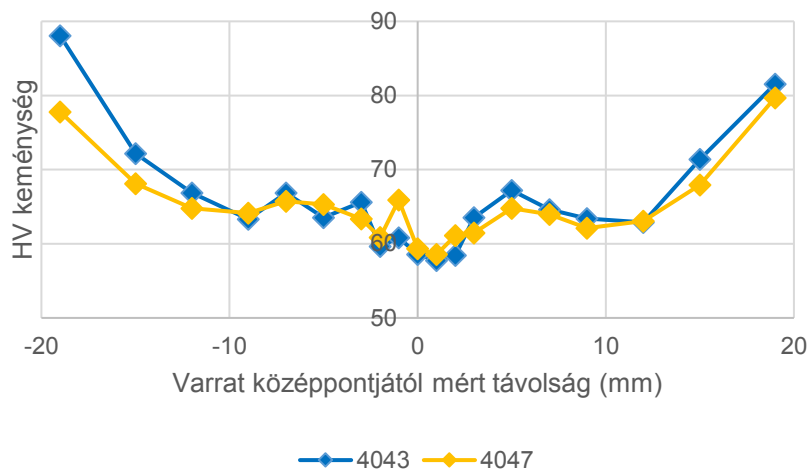
A 4043-as és 4047-es hozaganyaggal a hegesztőautomata segítségével tompavarratokat is készítettem. Az alapanyag 6082-es 50x150x3 mm-es alumínium lemez volt, melynek T6-os hőkezeltségi állapotának ellenőrzését keménységméréssel ellenőriztem. A mért értékek ebben az esetben is 55 és 60 HRB között voltak. Ezek az értékek 100-110 HV keménységnek felelnek meg.

A tompavarratokat 130 A árammal, 13 V feszültséggel készítettem a hegesztő automata segítségével. A hőbevitel 0,71 kJ/mm volt.

A keménységméréshez Buehler IndentaMet 1105 mikrokeménység mérő berendezést alkalmaztam. A tompavarratokból 2-2 megközelítőleg 25 mm széles darabot vágtam ki, amelyekből metallográfiai csiszoltokat készítettem. A keménység mérő gépen 500 dkg terhelést használtam, így a nagyobb lenyomatok pontosabban leolvashatóak voltak.

A mérés eredményeként átlagosan a 4043-as varratok keménysége 66, míg a 4047-é 65 HV volt. A minimális keménységérték a 4043-as hozaganyagnál 55 HV, míg a 4047-nél 57 volt.

A 7. Ábrán a 2-2 hegesztett tompavarratokon mért keménységértékek átlaga látható. Megfigyelhető, hogy a varrat középpontjától számított 20. mm-ig még nem érik el a mért értékek az alapanyag 100 HV körüli keménységét és a 4043-as hozaganyag esetében nagyobbak a csiszolat szélén mért értékek, mint a 4047-nél.



7. Ábra: Az átlagos keménységértékek összehasonlítása 4043 és 4047 hozaganyaggal készített varratok esetében

A tompavarratalakot a méréseim alapján csak szabad szemmel vizsgáltam. Úgy tűnt, hogy a 4047-es hozaganyag nagyobb szilíciumtartalma miatti jobb folyóképessége révén hajlamosabb homorú varratok létrehozására. Ezt a különbséget érdemes lehet a két hozaganyag kapcsán a későbbiekben kivizsgálni.

8. Összefoglalás

Az általam elvégzett halszálla próbák eredményei alapján az alábbi megállapítások tehetők. A tiszta alumínium és 6082-T6 alumíniumötvözet TIG-hegesztése esetében egyaránt a 4047-es (Si = 11 – 13 %) hozaganyag a legelőnyösebb választás a kristályosodási repedés elkerülésének érdekében. A melegrepedékenységi mérőszám mindkét esetben $A_r = 37\%$ -nak adódott.

A 6082-T6-os alapanyag lágyulását a 4047-es és 4043-as hozaganyaggal készült varratok esetében keménységméréssel hasonlítottam össze. Az eredmények alapján a keménységek átlagát tekintve, bár csak kicsivel, de a 4043-as hozaganyag (66 HV) lágyult ki kevésbé, mint a 4047-es (65 HV). A mért minimum értékek ezzel szemben a 4047-es hozaganyagnál (57 HV) voltak előnyösebbek, mint a 4043-nál (55 HV).

Irodalomjegyzék

- [1] Német Gréta, Kovács Judit, Raghawendra Sisodia, és Gáspár Marcell: Hőhatásövezeti tulajdonságok fizikai szimulációra alapozott vizsgálata különböző szilárdságú autóiipari alumínium ötvözetek esetén, *Hegesztéstechnika* 30, vol. 2, no. 10, pp. 41–50, 2019.
- [2] Szalva Péter: Vákuumöntésű nyomásos alumínium alkatrészek fogyóelektródás, védőgázos hegesztése, *Bányászati és kohászati lapok*, vol. 151, no. 1, pp. 14–18, 2018.
- [3] Gáspár Marcell, Jámor Péter, Kaijalainen Antti, Tervo Henri és Török Imre, "A hőkezeltiségi állapot hatása az AlSi1Mg alumínium ötvözet ellenállás ponthegeztésére," *Hegesztéstechnika* 29, vol. 4, no. 6, pp. 53–58, 2018.
- [4] Kovács Tünde and Szilágyi Mihály, Alumínium vékony lemezek ultrahangos hegesztése, *Hegesztéstechnika*, vol. 27, no. 3, p. 69, 2016.

- [5] Mejlínger Ákos és Lukács János, Két alumíniumötvözet lineáris dörzshegesztéssel készült kötéseinek viselkedése ismétlődő igénybevétel esetén, *GÉP 64*, vol. 8, no. 6, pp. 25–30, 2013.
- [6] Dr. Béres Lajos, Dr. Gáti József, Dr. Gremesberger Géza, Dr. Komócsin Mihály, és Dr. Kovács Mihály: Hegesztési Zsebkönyv, Debrecen, Magyarország: COKOM Mérnökiroda Kft., 2003.
- [7] Aluminium-Schweißen, Schulungsunterlage. Fronius GmbH.
- [8] Gruber Györgyné: Szabványos könnyűfémek és ötvözeteik jellemzői, alkalmazása, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest, pp. 9–14, 2008,
Online: https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetencia_keresi_ertekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/5_0225_006_101115.pdf. (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [9] MSZ EN 573-1:2005 Alumínium és alumíniumötvözetek. Az alakított termékek vegyi összetétele és alakja. 1. rész: Számjelölési rendszer. Magyar Szabványügyi Testület, 2005.
- [10] Gene Mathers, The Welding of Aluminium and its Alloys, Abington Hall, Abington Cambridge CB1, 6AH, England, 2002.
- [11] Elisa Fracchia, Federico Simone Gobber, and M. Rosso: About weldability and welding of Al alloys : case study and problem solving, *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 85, no. 2, pp. 67–74, 2017.
- [12] MSZ EN ISO 4063:2016 Szabvány Hegesztés és rokon eljárások. A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk, Magyar Szabványügyi Testület, 2016.
- [13] MSZ EN ISO 14175 Hegesztőanyagok. Gázok és gázkeverékek ömlesztőhegesztéshez és rokon eljárásokhoz, Magyar Szabványügyi Testület, 2008.
- [14] Kristóf Csaba: Hegeszthetőség és gyártástervezés. pp. 28–37, 2018.
- [15] John C. Lippold, Welding Metallurgy and Weldability. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [16] Hegpont, ML 1450 (Al 99,5Ti) alumínium hegesztőanyag Online: https://www.hegpoint.hu/docs/ML_1450_Al995Ti.pdf. (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [17] Tony Anderson, Welding Aluminum — Questions and Answers. Miami: American Welding Society.
- [18] Yewu Wang, Volker Schmidt, Stephan Senz, and Ulrich Go: Epitaxial growth of silicon nanowires using an aluminium catalyst, *Nature Nanotechnology* vol. 1, no. December, pp. 8–11, 2006
- [19] Hegpont, ML 4043 (AlSi5) alumínium hegesztőanyag Online: https://www.hegpoint.hu/docs/ML_4043_AlSi5.pdf. (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [20] Hegpont, ML 4047 (AlSi12) alumínium hegesztőanyag Online: https://www.hegpoint.hu/docs/ML_4047_AlSi12.pdf. (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)
- [21] MSZ 4312/2-78 Alumínium és alumíniumötvözetek hegeszthetőségi vizsgálata. Alapanyag melegrepedés-érzékenységi vizsgálata 'halszájka'-próbatesttel, Magyar Szabványügyi Testület, 1978.
- [22] Alloy Data Sheet - EN AW-6082 (AlSi1MgMn), *Nedal Aluminum*. Online:

<https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2016/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6082.pdf>. (Utoljára megnyitva: 2021.01.02)

- [23] Silvia Cecchel, D. Ferrario and Giovanna Cornacchia, Heat treatments of EN AW 6082 aluminum forging alloy: Effect on microstructure and mechanical properties, *Metallurgia Italiana*, vol. 112, no. 3, pp. 6–13, 2020.
- [24] Christian Vargel: *Corrosion of Aluminium*. Elsevier Science, 2004, pp. 52-56
- [25] A. Sili and S. Missori: Mechanical behaviour of 6082-T6 aluminium alloy welds, *Metallurgical Science and Tecnology*, vol. 18, no. 1, 2013.

HEGESZTETT SZERKEZETEK TERVEZÉSÉNEK KUTATÁSA A MISKOLCI EGYETEMEN

RESEARCH ON WELDED STRUCTURE DESIGN AT THE UNIVERSITY OF MISKOLC

Dr. Jármái Károly

Miskolci Egyetem

jarmai@uni-miskolc.hu

Petrik Máté

Miskolci Egyetem

vegypet@uni-miskolc.hu

Erdős Antal

Miskolci Egyetem

vegyer@uni-miskolc.hu

Nagy Szilárd

Miskolci Egyetem

vegynsz@uni-miskolc.hu

Hazim Nasir Ghafil

Miskolci Egyetem

vegyhng@uni-miskolc.hu

A cikk bemutatja a Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetében folyó hegesztett szerkezetekre vonatkozó kutatásokat. Az első téma az aszimmetrikus I-tartó optimalizását, ahol különböző anyagú, fesztávú, terhelésű tartók tömegminimumra történő méretezése folyik oly módon, hogy rugalmas előhajlítással a tartó vetemedése nulla lesz. A második téma futódaru hegesztett főtartójának optimalizálás költségre, ahol a statikus feszültség, a lokális horpadási feltételek, a fáradás és a lehajlás kerülnek figyelembevételre. Itt a grafikus processzor kártya (GPU) programozásával a párhuzamos számításokkal jelentős gyorsítás érhető el a számítási sebességben. Harmadik téma a tartályok méretezése, ahol a tartály alakja, mérete, tetőszerkezete, a tárolt anyag hőmérséklete és kémiai aktivitása jelentősen befolyásolják a tervezési modell kialakítását. A korrózió és a tűzvédelmi hatások és előírások további megkötéseket eredményeznek. Negyedik téma a robot, mint csuklós mechanizmus tervezése a direkt kinematika (forward kinematics) és a Denavit-Hartenberg-féle transzformáció felhasználásával. Mindegyik alkalmazási terület azt mutatja, hogy a szerkezetoptimalizálás segítségével jelentős tömeg és költségmegtakarítás érhető el.

The article presents the research on welded structures at the Institute of Power and Chemical Engineering of the University of Miskolc. The first topic is the optimization of asymmetric I-beams, where beams of different materials, spans and loads are dimensioned to a minimum of mass in such a way that the shrinkage of the beam will be zero with flexible pre-bending. The second topic is the cost optimization of the welded main girder of the overhead crane, where static stress, local buckling conditions, fatigue and deflection are taken into account. Here, by programming the graphics processor unit (GPU) with parallel calculations, significant acceleration in computing speed can be achieved. A third topic is the sizing of tanks, where the shape, size, roof structure, temperature, and chemical activity of the stored material significantly influence the design model. Corrosion and fire protection effects and regulations result in additional constraints. A fourth topic is the design of the robot as an articulated mechanism using forward kinematics and Denavit-Hartenberg transformation. Each application shows that significant weight and cost savings can be achieved with structural optimization.

1. Bevezetés

Az innovatív tervezést az jellemzi, hogy olyan szerkezeti variánsokat fejlesztünk ki, amelyek az eddigiekhez képest jobb tulajdonságokkal rendelkeznek, vagyis könnyebbek, biztonságosabbak, gazdaságosabbak. A korszerű mérnöki teherviselő szerkezetek fő követelményei a biztonság, gyárthatóság és gazdaságosság. Optimális tervezési rendszerünk biztosítja a biztonságot és gyárthatóságot a tervezési és gyártási feltételek kielégítésével és a gazdaságosságot a költségfüggvény minimálásával. A költségsökkentéshez megfelelő költségfüggvény és hatékony matematikai szélsőérték-számító módszer

szükséges. Ezért kifejlesztettünk egy aránylag egyszerű költségszámítást hegesztett szerkezetekre és adaptáltunk több matematikai optimáló módszert. Jelen cikk ezt a tervezési irányt mutatja négy alkalmazási területen.

2. Aszimmetrikus hegesztett I-szelvény optimalítása minimális tömegre és vetemedésre

A hegesztési feszültségeket és alakváltozásokat a varratok gátolt zsugorodása okozza. Ezek károsan befolyásolják a szerkezet működését, mert a húzó feszültségek növelik a fáradási repedések terjedési sebességét, a nyomófeszültségek pedig csökkentik a nyomott rudak kihajlási és a lemezek és héjak horpadási szilárdságát. A vetemedések méret-pontatlan szerkezeti elemeket, selejtet eredményezhetnek. Ezért szükséges, hogy számításal előre megbecsüljük nagyságrendjüket és előzetes vagy utólagos csökkentési eljárásokat alkalmazzunk.

Okerblom [1], Vinokurov [2], Masubuchi [3] és Kuzminov [4] könyveikben különböző számítási eljárásokat dolgoztak ki. Okerblom az egyenes rudak hosszvarrataiból származó zsugorodások és vetemedések számítására aránylag egyszerű képleteket adott, amelyek jól használhatók az előzetes megbecslésekre, ezért ezeket adaptáltuk (Farkas, Jármai [5, 6]).

Az A_T hőimpulzusra Okerblom a következő közelítő képletet javasolta:

$$A_T = \frac{0.4840\alpha_o Q_T}{c_o \rho t} \ln 2 = \frac{0.3355\alpha_o Q_T}{c_o \rho t} \quad (1)$$

ahol $Q_T = \eta_o \frac{UI}{v_w} = q_o A_w$ a hőbevitel, U a feszültség, I az áramerősség, v_w a hegesztési sebesség, c_o a fajhő, η_o a hegesztés hatásfoka, q_o az egységnyi varratkeresztmetszetre eső fajlagos hő (J/mm^3), A_w a varrat keresztmetszeti területe.

Látható, hogy ez a képlet tartalmazza a hegesztési paramétereket és az alapanyag jellemzőit, ezért igen jól alkalmazható acélokon kívül más anyagokra, pl. alumínium-ötvözetekre is.

Hegesztett acélszerkezetekre $\alpha_o = 12 \times 10^{-6} [1/^\circ C]$, $c_o \rho = 4.77 \times 10^{-3} [J/mm^3/^\circ C]$, így $A_T t [mm^2] = 0.844 \times 10^{-3} Q_T [J/mm]$

és a rúd-keresztmetszet súlyponti szálának fajlagos zsugorodására és a vetemedési görbületre vonatkozó alapvető Okerblom képletek

$$\varepsilon_G = \frac{A_T t}{A} = -0.844 \times 10^{-3} \frac{Q_T}{A} \quad (2)$$

$$C = \frac{A_T t y_T}{I_x} = -0.844 \times 10^{-3} \frac{Q_T y_T}{I_x} \quad (3)$$

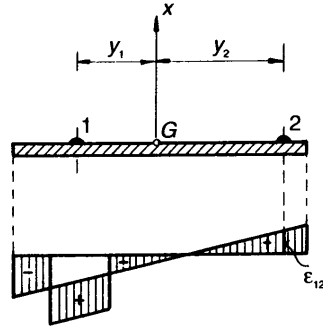
2.1 A kezdeti fajlagos nyúlás hatása

Az eddigi számításokban feltételeztük, hogy a hegesztendő szerkezeti részben nincsenek kezdeti alakváltozások. A valóságban ilyen alakváltozások lehetnek, illetve több varrat esetén az előző varrat(ok) idézhetik elő ezeket (1. ábra). Előmelegítés, lángvágás vagy előfeszítés okozhat ilyeneket. Ezek hatásának figyelembevétele a v_m módosító tényezővel történik. Ez a kezdeti nyúlással, illetve anélkül fellépő hőterhelés hányadosa

$$v_m = \frac{A'_T}{A_T} = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_y})}{\ln 2} \approx 1 - \frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_y} \quad (4)$$

A közelítő képlet kezdeti húzó fajlagos nyúlás esetén érvényes vagyis ha $\frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_y} \geq 0$.

A módosító tényező segítségével meghatározható egyszerűbb esetekben a helyes hegesztési sorrend.



1. ábra.
Kezdeti fajlagos nyúlás a 2-jelű varrat helyén az 1-jelű varrat hatására

Az 1-jelű varratból keletkező súlyponti száلبeli fajlagos nyúlás és görbület

$$\varepsilon_{G1} = \frac{A_{T1}t}{A}; \quad C_1 = \frac{A_{T1}t y_T}{I_x}, \quad (5)$$

valamint a fajlagos nyúlás a 2-jelű helyen

$$\varepsilon_{I12} = \varepsilon_{G1} + C_1 y_2 = A_{T1}t \left(\frac{1}{A} + \frac{y_1 y_2}{I_x} \right), \quad (6)$$

a módosító tényező, vagyis hogyan érvényesül a varrat hatása

$$\nu_{m12} = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\varepsilon_{I12}}{\varepsilon_y})}{\ln 2} \approx 1 - \frac{\varepsilon_{I12}}{\varepsilon_y} \quad (7)$$

A két egymás után hegesztett 1-es és 2-es varrat hatására keletkező súlyponti száلبeli fajlagos nyúlás és görbület az első varrat okozta kezdeti fajlagos nyúlás figyelembevételével

$$\varepsilon_{G(1+2)} = \varepsilon_{G1} + \nu_{m12} \varepsilon_{G2} = \varepsilon_{G1} \left(1 + \nu_{m12} \frac{Q_{T2}}{Q_{T1}} \right), \quad (8)$$

$$C_{1+2} = C_1 + \nu_{m12} C_2 = C_1 \left(1 + \nu_{m12} \frac{Q_{T2} y_2}{Q_{T1} y_1} \right). \quad (9)$$

2.2 Hegesztés rugalmasan előhajlított állapotban

A gyártási sorrend: összefűzés, befogás, előhajlítás, hegesztés, feloldás. A lényeges deformációk és repedések elkerülése érdekében ajánlatos legfeljebb folyáshatárig terhelni

$$M_y = \frac{f_y I_x}{y_{\max}} \quad (10)$$

$$\text{A } M_y \text{ által okozott görbület és deformáció } C_y = \frac{M_y}{EI_x}, \quad w_y = \varepsilon_y \frac{L^2}{8y_{\max}} \quad (11)$$

Az előhajlítás mértéke $w_p < w_y$ kisebb legyen, mint a folyáshatárhoz tartozó alakváltozás. A hegesztés előtt, a hegesztés helyén fellépő fajlagos alakváltozás

$$\varepsilon_P = C_p y_T = w_p \frac{8y_T}{L^2} \quad (12)$$

$$\text{a módosító tényező az } \nu_m = 1 - \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_y} \quad (13)$$

A hegesztés során a gerenda görbült alakban tartásához szükséges hajlítónyomaték két részből áll, az alábbiakból:

$$\text{az előhajlításához szükséges nyomatékból } M' = I_{\xi} E C_p = 8 w_p \frac{E I_{\xi}}{L^2} \quad (14)$$

és a k hegesztési maradó deformációk kiküszöböléséhez szükséges nyomatékból

$$M'' = \nu_m I_{\xi} E C = 8 \nu_m w \frac{E I_{\xi}}{L^2} \quad (15)$$

Ezek a nyomatékok ellentétesen hatnak a feloldás után, és csökkentik a deformációkat,

$$M = M' + M'' = I_{\xi} E C_p + \nu_m I_{\xi} E C \quad (16)$$

A végső alakváltozás kifejezhető az alábbiakkal

$$w_f = w - w_p = \frac{M' + M''}{8 E I_x} L^2 - w_p \quad (17)$$

$$w_f = (w_p + \nu_m w) \frac{I_{\xi}}{I_x} - w_p \quad (18)$$

$$\text{ahol } \nu_m = 1 - \frac{8 w_p y_T}{L^2 \varepsilon_y}$$

Az I_x az teljes keresztmetszet tehetetlenségi nyomatéka. I_{ξ} a rugalmas keresztmetszet tehetetlenségi nyomatéka, amelyet a hegesztési zóna csökkent, C a gerenda görbülete, amelyet szabad állapotban történő hegesztés okoz, a korrekciós tényező a (7) szerinti. A maradó hegesztési alakváltozások teljes kiküszöböléséhez szükséges előfeszítés w_p kiszámítható a $w_f = 0$ feltételből.

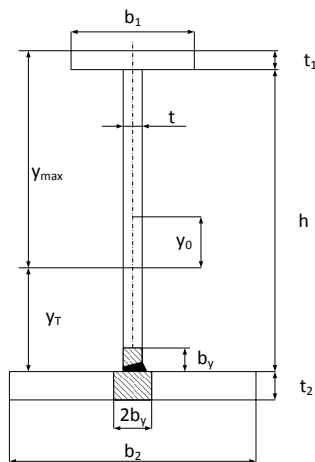
$$w_p = \frac{w}{\frac{I_x}{I_{\xi}} + \frac{8 y_T w}{L^2 \varepsilon_y} - 1} \quad (19)$$

A gerendánál egy hegesztett kötés van (2. ábra). A megadott paraméterek a hegesztett gerenda esetében a következők:

- Az L gerenda hossza méterben, 5-10 m között változik,
 - Egyenletesen megoszló F erő N-ban, 10000-100000 N között változik,
 - Young modulus E MPa-ban, 210 GPa acélokhoz, 70 GPa alumíniumhoz,
 - Az f_y folyáshatár MPa-ban, 235-460 MPa között változik, alumínium esetén 80-230 MPa,
 - Az anyag sűrűsége ρ kg/m³-ben, acélokénál 7850 kg/m³, alumíniumnál 2700 kg/m³,
 - c fajhő J/kgK-ban, acél esetében $c = 510$ J/kgK, alumínium esetén $c = 910$ J/kgK,
- Hőtágulási paraméter K -ben, acélokénál $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$ K, alumíniumnál $\alpha = 22 \cdot 10^{-6}$ K

A keresztmetszet méretei a következők:

- b_1 a felső karima szélessége,
- t_1 a felső karima szélessége, h a szalag magassága,
- t a szalag vastagsága,
- b_2 az alsó karima szélessége,
- t_2 az alsó karima szélessége,

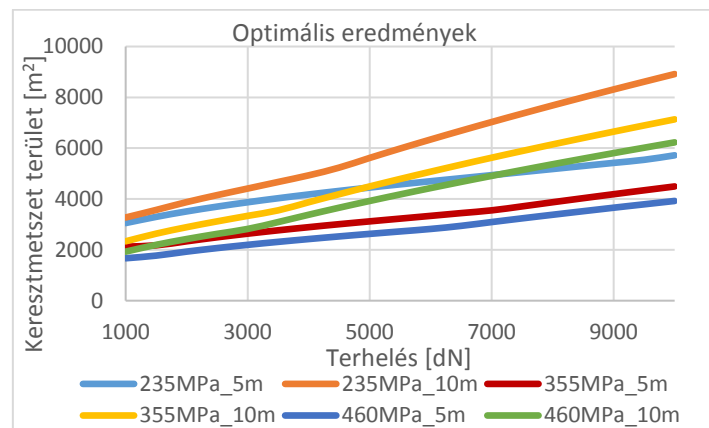


2. ábra.
Az aszimmetrikus hegesztett szelvény méretei

Bemenő adatok: $L = 10 \text{ m}$ $F = 98100 \text{ N}$ $f_y = 460 \text{ MPa}$ a lemez szöge hegesztés előtt: $\beta = 50^\circ$ alkalmazott hőbevitel: 60700 J/m^3 az alkalmazott szabvány az Eurocode 3 és 9 [7, 8]. Excel fájl készítésével kiszámítottuk az optimális értéket; az eredmények a következők (1. táblázat):

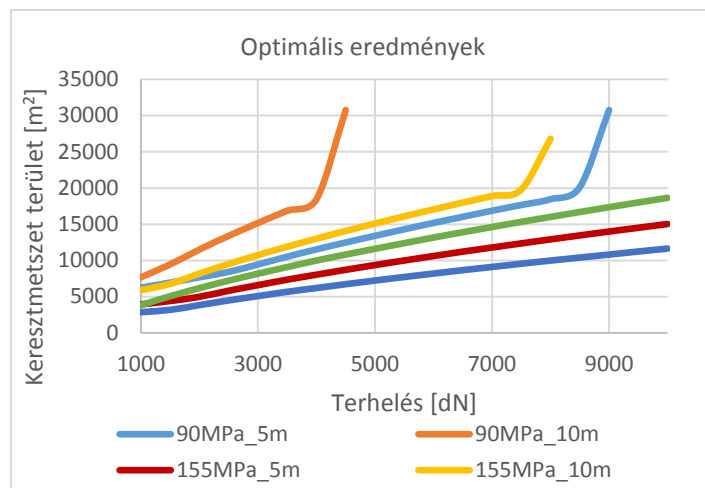
1. táblázat
A szelvény optimális méretei [mm]

b_1	188,67685
t_1	9,427696
h	362,93855
t	7,3591728
b_2	188,67685
t_2	9,4276958



3. ábra
Optimális eredmények acélok esetén

A 3-as és 4-es ábra mutatja az optimális keresztmetszet területet (tömeget) különböző folyáshatárú acél és különböző alumínium ötvözet esetén. Látható, hogy közel lineáris a növekedés a terheléssel. Az, hogy a növelt folyáshatárú acéllal tömegcsökkenés érhető el. Növelve a gerenda hosszúságát jelentősen növekszik a tömeg. Alumínium esetén a terhelés növelésének alacsonyabb határa van, a lágyabb alumínium nem tud megoldást adni nagyobb terhelések esetén. Az eredmények azt mutatják, hogy elvégezhető az optimalizálás.



4. ábra
Optimális eredmények különféle alumínium esetén

3. Futódaru hegesztett szekrényszelvényű főtartójának optimalizálása GPU programozással

A meta-heurisztikus és evolúciós módszerek napjaink hatékony eszközei nem lineáris folytonos, vagy korlátos optimalizálási problémák megoldására. Ezeket az alábbi formába lehet összefoglalni:

$$\begin{aligned}
 & \min f(x) \\
 & \text{ha } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q \\
 & \quad h_j(x) = 0 \quad j = q + 1, \dots, n \\
 & x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in F \subseteq S
 \end{aligned} \tag{20}$$

ahol F a lehetséges megoldások halmaza és S pedig a keresési tér. Az evolúciós algoritmusok felépítése és működése hasonló. Ez azt jelenti, hogy a kezdeti populáció egyedeit módosítja természet inspirálta technikák segítségével. A módosított egyedekkel pedig minden iterációs lépésben kiszámolja a célfüggvényt. Párhuzamosítással csökkenthető a szükséges számítási idő. Az evolúciós algoritmusok különböző módokon párhuzamosíthatóak [9]:

- globális modell: legegyszerűbb módszer csak az elemi műveletek futnak párhuzamosan
- regionális modell: a teljes populáció azonos méretű kisebb csoportokra kerül felbontásra, és ezek a populációkon történik egymástól függetlenül, párhuzamosan az optimalizáció. Meghatározott időközönként a populációk között a kommunikációt a migráció biztosítja.
- lokális modell: minden egyed egy külön neki dedikált szálon, mikroprocesszoron fut és csak a szomszédával kommunikál.

Ma már a GPU-k nem csak a grafikus megjelenítést és az azokhoz szorosan kapcsolódó számítások elvégzését támogatják. Olcsó és hatékony eszközei az általános célú, tudományos számításoknak. Sikeresen kiaknázzák az általuk nyújtott lehetőségeket a topológiai optimalizálásban [10], szerkezet optimalizálásban [11]. SIMD (egyazon művelet, több adaton) programozási modell implementálásával, egy masszívan párhuzamos környezetet kínálnak. Napjainkban két keretrendszer alkalmaznak ezen kártyák programozására. Az első az OpenCL, ami egy nyílt forráskódú rendszer. A második pedig csak kizárólag az NVIDIA kártyákat támogató CUDA [12]. Mi ezt használjuk.

A futódaru kialakítását és méreteit az 5. ábra mutatja.

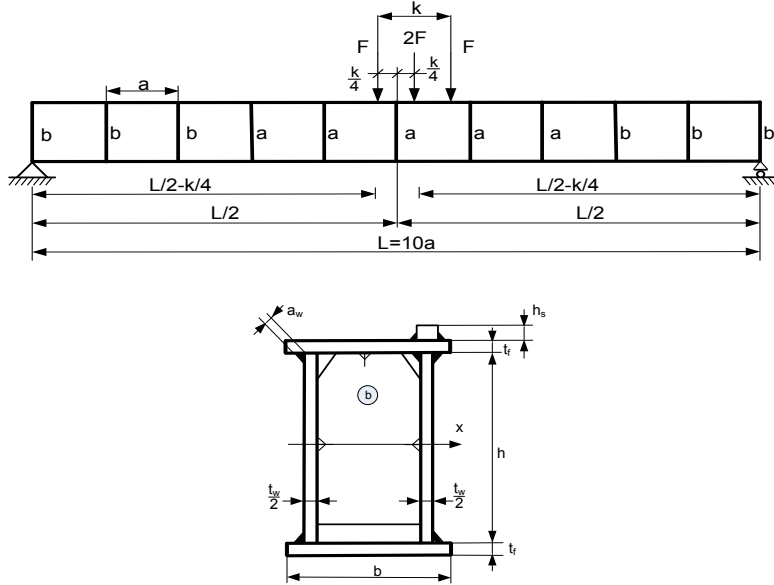
Változó: a szekrényszelvény négy mérete: h , $t_w/2$, b , t_f

Célfüggvény (fitness function):

Költség: anyagköltség, hegesztési előkészítés, tényleges hegesztés, pótlólagos hegesztési költség

$$f(\bar{x}) = K_m + \sum_i K_{wi} + K_p \quad (21)$$

Méretezési feltételek: statikus feszültség, helyi horpadás, fáradás, lehajlás.



5. ábra.

Futódaru főtartó kialakítása, méretei

- Az anyagköltség:

$$K_m = \hat{K}_{m1} h t_w + \hat{K}_{m2} b t_f + \hat{K}_{m3} b h \quad (22)$$

- A felső övlemez összefűzési és hegesztési költsége

$$K_{w1} = \hat{K}_{w1,1} \sqrt{\hat{K}_{w1,2} h t_w + \hat{K}_{w1,3} b t_f + \hat{K}_{w1,4} b h} + \hat{K}_{w1,5} \quad (23)$$

- A sín összeállítási hegesztési költsége

$$K_{w11} = \hat{K}_{w11,1} t_w^{1,94} \quad (24)$$

- A diafragmák összeállítási és hegesztési költsége

$$K_{w12} = \hat{K}_{w12,1} b t_w^2 + \hat{K}_{w12,1} h t_w^2 \quad (25)$$

- Az alsó övlemez összefűzési és hegesztési költsége

$$K_{w2} = \hat{K}_{w2,1} \sqrt{\hat{K}_{w2,2} h t_w + \hat{K}_{w2,3} b t_f + \hat{K}_{w2,4} b h} + \hat{K}_{w2,5} \quad (26)$$

- A két gerinc összeállítási és hegesztési költsége 11db 1500mm-es lemezből

$$K_{w3} = \hat{K}_{w3,1} \sqrt{h t_w} + \hat{K}_{w3,1} b t_w^{1,94} \quad (27)$$

- A két övlemez lemez összeállítási és hegesztési költsége 11db 1500mm-es lemezből

$$K_{w4} = \hat{K}_{w3,1} \sqrt{b t_f} + \hat{K}_{w3,1} b t_f^{1,94} \quad (28)$$

- A hegesztési utókezelés költsége

$$K_t = \hat{K}_{t,1} b \quad (29)$$

- A teljes költség

$$f(\bar{x}) = K_m + K_{w1} + K_{w11} + K_{w12} + K_{w2} + 2K_{w3} + 2K_{w4} + K_t \quad (30)$$

3.1 Fitness függvény párhuzamos számítása módosított párhuzamos redukcióval

Evolúciós algoritmusok alkalmazása során a fitness függvény egy speciális függvény. Ez rangsorolja iterációs lépésenként az egyedeket. A felépítésük algoritmusonként és megoldandó feladatonként különböző lehet. A különbözőség ellenére van egy közös tulajdonságuk, mindegyik egy redukciót hajt végre. Azt jelenti, hogy a több dimenziós térhez egyetlen számot rendel. Mérnöki problémák esetén ez az esetek többségében egy valós szám.

$$\mathcal{F} = \mathcal{F} \left(f(\bar{x}), g_1(\bar{x}) \cdots g_q(\bar{x}), h_1(\bar{x}) \cdots h_r(\bar{x}) \right) \quad (31)$$

$$\mathcal{F}: S^D \mapsto \mathbb{R}$$

ahol S^D a D dimenziójú keresési tér.

A párhuzamos redukció egy jól ismert eleme a párhuzamos technikák eszköztárának.

Az eredeti fitness függvény felbontható egyszerűbb al-függvények variációjára

$$\mathcal{F}(x) = \mathcal{F}_1(\bar{x}_{v1}) \otimes_1 \mathcal{F}_2(\bar{x}_{v2}) \otimes_2 \cdots \otimes_{n-1} \mathcal{F}(\bar{x}_{vn}) \quad (32)$$

ahol az $\bar{x}_{v1}, \bar{x}_{v2} \cdots \bar{x}_{vn}$ vektorok elemei az eredeti $\bar{x}$ vektor elemeinek a variációja. Az így kapott al-függvények további egyszerűbb függvényre felbontható. Azt a felbontást addig kell ismételni míg az eredeti függvény olyan egyszerű függvényekből nem áll, amire igaz, hogy két változótól és egy α konstanstól függ és kiszámíthatóak egy lépésben.

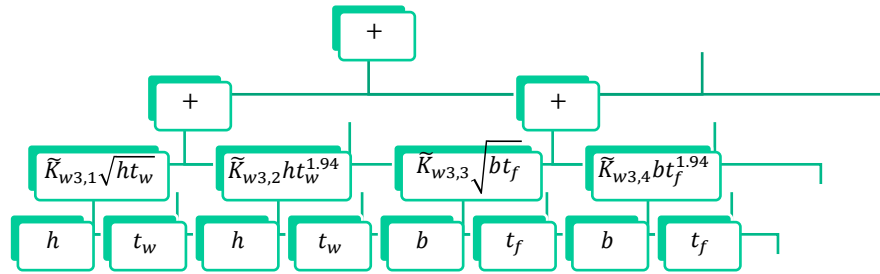
$$\mathcal{F} = \mathcal{F}(x_i, x_j, \alpha) \quad (33)$$

ahol i, j független indexek.

Az alapvető matematikai műveleteket, mint az összeadást, kivonást, szorzást, osztást stb. programozás technikailag függvényként szükséges kezelni. Az al-függvények hierarchiája ábrázolható egy fa szerkezetben, mint azt a 6. ábra szemlélteti. A fa levelei – a bemeneti változók – az eredeti $\bar{x}$ vektor elemeinek a variációja. A csomópontok tartalmazzák a felbontásból származó „egyszerű” függvényeket. Az alsóbb szintek bemenő adatai pedig minden esetben az öt megelőző szinten elhelyezkedő függvények eredményei. Látható, hogy egy adott szinten található függvények nem függenek egymástól ezért kiszámíthatóak párhuzamosan.

A számítás párhuzamossá tétele a futódaru főtartónál a szerelési és hegesztési költség-részlet vonatkozásában kerül bemutatásra (6. ábra)

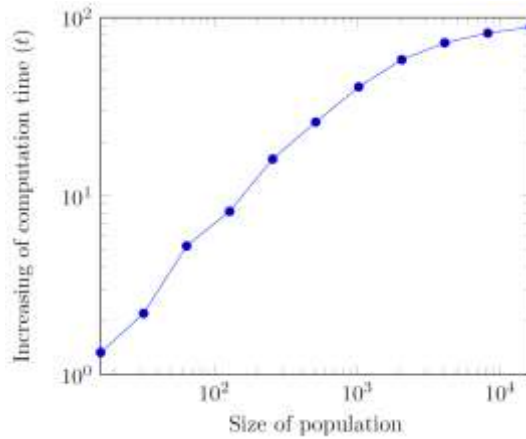
$$K_w = \tilde{K}_{w3,1}\sqrt{ht_w} + \tilde{K}_{w3,2}ht_w^{1.94} + \tilde{K}_{w3,3}\sqrt{bt_f} + \tilde{K}_{w3,4}bt_f^{1.94}$$



6. ábra.

Futódaru főtartó költség-számítása egy elemének párhuzamosítása

A 7. ábra mutatja a futódaru főtartó optimalálása futásidőjének növekedését az optimaláló algoritmus populációszáma függvényében négy változó esetén. Látható, hogy közel százszorosra növekedett a sebesség.



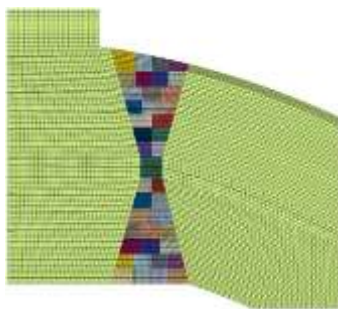
7. ábra.

Futódaru főtartó futásidő növekedése a populációszám függvényében négy változó esetén

A vizsgálatok azt mutatják, hogy szekrényszelvényes futódaru főtartó optimalálása elvégezhető költségminimumra, a statikus feszültségi, helyi horpadási, fáradási és lehajlási feltételek figyelembevételével. GPU programozással ez a számítás jelentősen meggyorsítható.

4. Tároló tartályok hegesztése, optimális méretezése

Tárolótartályok hegesztett kötéseire számos előírás vonatkozik, amelyeket a tartály tervezésére vonatkozó szabvány tartalmaz, ezek lehetnek akár az API 650 vagy az MSZ 14015 előírása. Ezek legtöbbször kevés konkrét adatot tartalmaznak és nagyban támaszkodnak a WPS-ben leírtakra vagy más szabványokra. Például az MSZ 14015 a hegesztett kötések vizsgálatát MSZ 15614 szerint írja elő. Követelményeket viszont támaszt arra vonatkozóan, hogy az adott varratot hány százalékban kell vizsgálni. Ez varrat típusonként eltérő. Kritikusnak tekinthető ebből a szempontból a peremlemez csatlakozások, a koronagyűrű valamint a csonkok és a zsomp varratai (8. ábra).



8. ábra

Szelepcsatlakozás varratának végeelem vizsgálata [1]

Napjainkban a varratok vizsgálatára még azok elkészítése előtt is van lehetőség a Végeelem Analízis segítségével. Ezen módszer keretein belül lehetőség van a hőmérséklet szimulációjával a maradó feszültségek becslésére egyaránt a varratra és a hőhatás övezetre. Több rétegre vonatkozóan is végezhető és az egyes rétegek egymásra hatása, az előmelegítés hőmérsékletének hatása is vizsgálható. Vizsgálatokkal igazolták, hogy az előmelegítés hőmérsékletének növelésével a maradó feszültségek csökkenthetők, míg a hőbevitelnek nincs annak mértékére akkora hatása [13].

Tárolótartályokat számos területen alkalmaznak az ipari gyakorlatban, amelyek közül a petrokémia az egyik legjelentősebb. Ezekben leggyakrabban nyers benzint tárolnak, amelyet további folyamatok során dolgoznak fel. Fémek szempontjából a legkedvezőtlenebb a kén, a hidrogén-szulfid jelenléte, illetve ezek vizes oldata. Ha a tárolt anyag víztartalma kicsi akkor a hatása elhanyagolható. Ha a tárolt ipari benzin víztartalma 80 ppm alatti, akkor az által okozott korrózió sebessége 0,001 mm/év-re becsülhető, ha a víztartalom 200 ppm alatti, akkor már 0,4 mm éves falvastagság csökkenéssel kell számolni. Víztartalmában fokozott az elektrokémiai korrózió veszélye. A tartályon négy korróziós zónát lehet megkülönböztetni [14]:

1. A tartály teteje, felső része, amelyen csak gőzzel érintkezik a tartályt felépítő acél
2. A határ a gőz és a folyadék között, ennek a mérete függ a tartályban lévő anyag mennyiségétől és a töltöttségi szinttől
3. A közvetlenül a folyadékkal érintkező részek, ennek nagysága a töltöttségtől függ
4. A tartály fenek és a vele közvetlen kapcsolatban lévő részek

A korrózió típusa függ: a tárolt anyag típusa, a tárolt anyag víz és levegő tartalma, a tartály kapacitása, a töltés és ürítés gyakorisága és a hőmérséklet. A tartály déli oldalának melegedésével számolni kell, ez a tárolt anyag hőmérsékletének növekedésével jár, amely rendszerint a vízdoldó képességet is növeli.

Az elektrokémiai korrózió lefolyása függ: a fém védő réteg jellemzőitől, ha van poláris oldószer, akkor annak tulajdonságaitól, az elektrolit jelenlététől és a hőmérséklettől. Függ továbbá az adott anyag esetén a tartály szerkezetétől, terheléstől és összetételtől (ez egyaránt vonatkozik a tartály anyagául szolgáló anyagminőségekre és a tárolt anyagra is).

A korrózió nem csak a tartályt támadja, hatással van a csővezetésekre, a szivattyúkra, motorokra. Ha a tárolt anyag bioüzemanyag, akkor annak korróziós hatása fokozott. Meg kell azonban jegyezni, hogy a hagyományos kőolaj és nyers

benzin hagyományosan nem tartalmaz bio komponenseket. Ezek hatása a nem ugyanolyan minden acélminőségre, például az alacsonyabb karbon tartalmú S235JR ebből a szempontból jobb anyag a C45-nél.

A korrózió hatásának számszerűsítésére a lineáris korróziós ráta szolgál, amely 1-től 10-ig terjed:

$$\frac{(m_1 - m_2) \cdot 24 \cdot 365}{1000 \cdot \rho \cdot T \cdot S} = 8,76 \cdot \frac{\Delta m}{\rho \cdot T \cdot S} \quad (34)$$

Amely összefüggésben:

- ρ az acél sűrűsége g/cm³-ben
- T az eltelt idő h-ban
- S a minta területe m²-ben

Tárolótartályok tüzeseteivel számos irodalom foglalkozik, és mivel azokban az esetek túlnyomó többségében azokban gyúlékony anyagot tárolnak. A tartálytüzeket a lángolás térbeli alakja szerint három csoportra lehet bontani [15]:

- pontszerű tüzek
- vonalszerű tüzek
- felületi tüzek

Különböző tartályalakításokra eltérő tüztípusok jellemzőek. Merevtetős tartályok tüztípusait csoportosítva felületi és pontszerű (lokális) lángolásokról beszélhetünk. Ennek megfelelően a felületi tüzek lehetnek:

- Teljes felületű tartálytűz;
- Takart felületű tartálytűz;
- Osztott felületű tűz;
- Részleges felületű tartálytűz;

Míg a pontszerű tüzek típusai az alábbiak:

- Szellőzők tüzei és a
- „Halszájak” tüzei;

A nyitott úszótetős tartályok esetében – a tűz elhelyezkedése és alakja szerint – vonalszerű és felületi tüztípusok is kialakulhatnak, melyek a következők:

- körgyűrű tű
- felületi tű alakulhat ki az úszótetőn
- részleges és teljes felületi tartálytűz

Belső úszótetős tartályok esetén a körgyűrű tűz és a szellőző tűz valamint a felületi tűz jöhet szóba.

Ha tüzeset történik akkor a leggyakrabban alkalmazott hűtőközeg víz. A hűtési folyamat pontos ismerete ugyanolyan fontos a tartály élettartamának szempontjából. A tüzeset során a hőmérséklet emelkedik. További probléma a hűtési sebesség, az acél mikroszerkezetének változása miatt. Elsősorban a keménység növekedésében és ezáltal az ütmunka csökkenésében nyilvánul meg. Tehát a tartály acélja rideggé válhat, ezáltal kevésbé lesz ellenálló a dinamikus terhelésekkel szemben.

A tároló tartályok tervezése során a fő igénybevétel a töltet súlyából adódó hidrosztatikus terhelésből származik. Ez azt jelenti, hogy a szükséges falvastagság növekszik a tartály feneke felé haladva. A falvastagság csökkenthető a nagyobb feszültségnek kitett helyeken, ha ott nagyszilárdságú acél kerül alkalmazásra. Meg kell azonban jegyezni, hogy az eltérő folyáshatárú acélok összekötése számos problémát vet fel, melyet a hegesztőmérnököknek kell megoldania. Habár a kémiai összetételek között nincs jelentős különbség, mégis az alapvető hegesztési folyamatok között jelentős eltérés van (9. ábra).



9. ábra

Tartályfenék szegmens

Azt lehet mondani, hogy a viszonylag alacsony folyáshatárral rendelkező szerkezeti acélok kivétel nélkül az 1-es kategóriába tartoznak a Graville-diagram szerint. Róluk elmondható, hogy előmelegítés, utólagos hőkezelés csak kivételes esetekben indokolt. Ilyen eset lehet, ha P jelű acél hegesztése történik, amelyek normalizált finomszemcsés, csillapított acélok és a hegesztési folyamat során a szemcseszerkezet eldurvulhat, amelyet utólagos hőkezeléssel lehet helyreállítani. Az alacsony karbon tartalmú acélok hőkezelésére vonatkozik az EN 1011-2-es szabvány. Nagyszilárdságú acélok (690, 960 MPa folyáshatárú acélok) esetén viszont mindig kell előmelegítés. Ennek értéke függ a karbon egyenértéktől, a diffúzióképes hidrogén tartalomtól, a vonalenergiától, az átlagos lemezvastagságtól. Két módszert is közöl, az egyik diagramok alapján határozza meg az előmelegítési hőmérsékletet, a másik számítás útján. Másik lényeges dolog a rétegek közötti hőmérséklet pontos betartása. Ezek ellenőrzésére hegesztési szimulációkat lehet alkalmazni, amely elemi a rétegeket a kialakuló szemcseszerkezet szempontjából, megbecsüli az ütmunkát és a keménység értékeit is [16].

5. Robot manipulátorok optimalizálása

Az inverz kinematika [17] a csuklós robotok sarokköve a mindennapi élet során történő alkalmazásában, mivel az összes többi robotfolyamat annak kimenetétől függ. A csuklós karú robot úgy mozog, hogy közös bemeneti értékeket ad a vezérlőknek [18], ennek megfelelően a kar vége a derékszögű koordináta rendszerben mozog. Ezt nevezzük direkt kinematikának, és ez egy egyszerű művelet, amely nem igényel komoly számításokat vagy optimalizálást. A derékszögű koordináta rendszerben történő mozgással foglalkozunk, mert erre van szükség az alkalmazások döntő részében, miközben a mozgás a csukló koordináta-rendszerben még mindig kevésbé ismert. A legnehezebb folyamat az, amikor a bemenet a derékszögű koordináta rendszerben adott és a feladat a közbenső csuklók adatainak kiszámítása. Ezt inverz kinematikának hívják. A robotok a derékszögű koordináta rendszerben adott pontok meghatározott pályáját követve olyan alkalmazásokat tesznek lehetővé, mint a hegesztés, vágás, csiszolás, festés stb. [19]. Így az inverz kinematika leképezi az end effektor (vagy csak a kar szélső végének) mozgását a derékszögű koordináta rendszerben. Érdemes megemlíteni, hogy az egyszerű topológiájú robotok esetében az inverz kinematika egyszerű és megoldható több más módszerrel, például geometriai vagy analitikai megoldásokkal. A bonyolult, nagy szabadságfokú robotok esetében a folyamatot nehéz vagy akár lehetetlen megoldani hagyományos módszerekkel [20].

Bemutatjuk az inverz kinematika célfüggvényének megfogalmazását, amelyet bármely optimalizációs algoritmus megoldhat. A dinamikus differenciális optimalizáló algoritmus (Dynamic annealed optimization algorithm, DDAO) [20] kifejezetten a robotkarok inverz kinematikai feladat megoldására javasolt. Ebben az algoritmusban az a különleges, hogy független a populáció méretétől, és ez teszi a DDAO-t tökéletesen beágyazott rendszerek vizsgálata során, amint azt a következőkben látható.

5.1. DDAO

A dinamikus differenciális optimalizáló algoritmus (DDAO) egy fizikailag ihletett optimalizáló algoritmus, ami utánozza a kétfázisú acél gyártásának folyamatát. A DDAO-nak egyedülálló jellemzője az, hogy független a populáció méretétől, ez azt jelenti, hogy a RAM minimális méretét használja, amikor három egyed népességméretét veszi figyelembe [21]. Természetesen más algoritmusok is alkalmazhatók, mint a részecske csoport optimalizálása [22], a genetikai algoritmus [23], a szürke farkas optimalizálás

[24]. Ezeket az algoritmusokat úgy lehet használni, hogy a populáció méretét a lehető legkisebbre állítjuk, és ami az inverz kinematikai probléma legjobb algoritmus, azt a felhasználó választhatja ki a jövőbeni munkák során.

5.2. GYAKORLATI PÉLDA

Ebben a tanulmányban a LabVolt 5150 ipari robot [25] került alkalmazásra az inverz kinematika kiszámításának javasolt módszertana bemutatására, optimáló algoritmus alkalmazásával. Ez egy 5 DOF manipulátor; forgástengelyei az alap, a váll, a könyök, a dőlés és forgás. Az összes forgócsuklót öt léptetőmotor működteti. A 10. ábra ezt az ipari robotot mutatja, a 11. ábra a robot konfigurációs terét, a 12. ábra pedig a lehetséges mozgásokat mutatja.

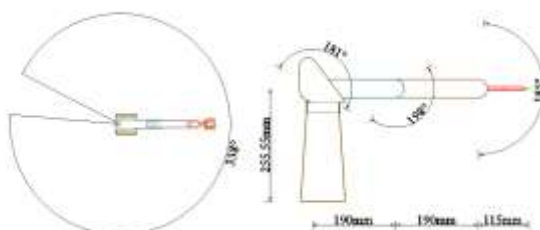
A Denavit-Hartenberg-féle transzformáció [26] alkalmazásával a csomópontok homogén transzformációs mátrixa felírható.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

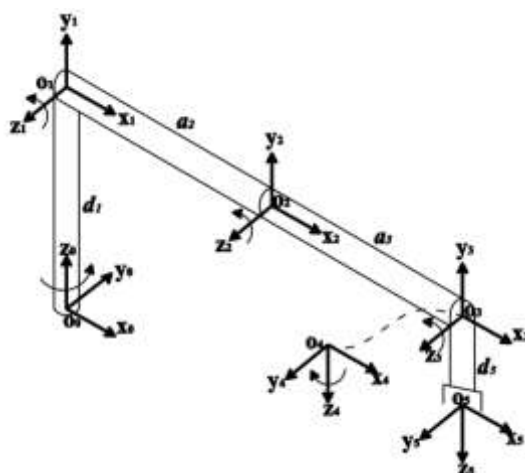
Míg a direkt kinematikai egyenletek egy egyenes folyamatban zajlanak, ezekre az egyenletekre támaszkodunk az inverz probléma célfüggvényének meghatározásához. Itt olyan közös változók optimális értékét keressük, amelyek a költségfüggvény minimumához vezethetnek.



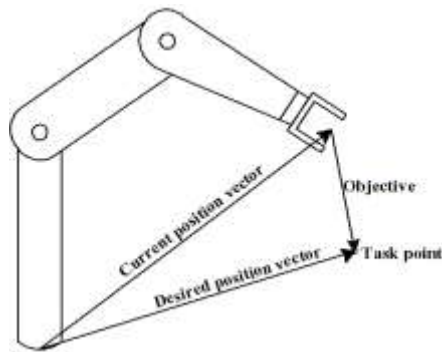
10. ábra.
A LabVolt 5150 manipulátor



11. ábra.
A Lab-volt 5150 lehetséges elfordulási szögei



12. ábra.
A csuklóponthi koordinátarendszerek a Lab-volt 5150-nál



13. ábra

Az inverz kinematikai feladat célfüggvényének ábrázolása

Tekintsük a 13. ábrát, hogy egy adott robotkonfiguráció esetében a robotvég aktuális helyzetvektorát a manipulátor vég-effektorának alapjától mért távolságával lehet ábrázolni, míg a kívánt pozícióvektor a feladat megoldási pontját képviseli. Nyilvánvaló, hogy ha a két vektor közötti különbség nulla, akkor a szerszámvég a megfelelő helyzetben lesz, és ez az inverz feladat f célfüggvénye.

$$f = \|C_i - D_e\| \quad (36)$$

Ahol C_i a pillanatnyi helyzetvektort jelöli, és D_e a kívánt pozícióvektor. Koordinátákkal megadva

$$f = \sqrt{(x_{C_i} - x_t)^2 + (y_{C_i} - y_t)^2 + (z_{C_i} - z_t)^2} \quad (37)$$

Ha a (37) egyenletet egyedül használták célfüggvényként, akkor a végpontot a feladat pontjában kaphatjuk meg, de sokféle irányválasztási lehetőséggel.

5.3 A CÉLFÜGGVÉNY ELJÁRÁSA

Ebben a szakaszban modellezzük egy robot inverz kinematikájának célfüggvényét. A 13. ábra az inverz probléma sematikus ábrázolását mutatja. Ennek a részletes leírása a következő:

1. Az optimáló algoritmus megadja a javasolt megoldást, amely a lehetséges csomóponti változók összessége. Ebből kerül meghatározásra a célfüggvény, ami a megfeleléségi (fitness) érték.
2. A célfüggvény tartalmazza a kívánatos csomóponti koordinátákat. Elküldi a lehetséges megoldást a Direkt kinematikai függvényhez, hogy megkapja a robotvég x , y és z koordinátáit.
3. A Direkt kinematikai függvény tartalmazza a robotkar összes kinematikai egyenletét, a javasolt megoldást ezekkel az egyenletekkel helyettesítve megkapjuk a teljes homogén transzformációs mátrixot egy ismételt HTM függvényhívással. A Forward függvény kimenete a teljes transzformációs mátrix helyzetvektora.
4. A célfüggvény megkapja a pozícióvektort, és a (37) egyenletet alkalmazásával megvizsgálja a javasolt vektor és a megkívánt pozíciós vektor távolságát. Az eredmény a megoldás megfeleltetése, amellyel visszatér a főprogramba.

Ennek a módszernek a végrehajtása nagy jelentőséggel bír a robot automatizálásban, következőképpen megkönnyíti és növeli a termelékenységet, különösen az autópálya felhasználásoknál. Az ipar széles körű alkalmazásokat kínál a robotok számára, ahol sok esetben és sok művelet során felhasználhatók [27, 28].

Összefoglalás

A bemutatott négy alkalmazási terület jól érzékelteti, hogy milyen hasznos a szerkezetoptimalizálás, mely során az aszimmetrikus I-tartó optimalizálása tömegminimumra történt, rugalmas előhajlítás során hegesztve a vetemedése elkerülésére. Továbbá a futódaru hegesztett főtartójának költségoptimalizálása esetén, ahol a grafikus processzor kártya (GPU) programozásával a párhuzamos számítások több nagyságrenddel meggyorsulnak. Valamint a tartályok méretezésénél, ahol a tartály alakja, mérete, tetőszerkezete, a tárolt anyag hőmérséklete és kémiai aktivitása jelentősen befolyásolják a tervezési modell kialakítását. A korrózió és a tűzvédelmi hatások és előírások további megkötéseket eredményeznek. Végül a robot, mint csuklós mechanizmus tervezése a direkt kinematika módszerével.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutató munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Okerblom, N.O., Demyantsevich, V.P. and Baikova, I.P. Design of Fabrication Technology of Welded Structures. (in Russian) Leningrad, Sudpromgiz, 1963.
- [2] Vinokurov, V.A. Welding Stresses and Distortion. (Translated from Russian), Boston Spa, Wetherby, England, The British Library, 1977.
- [3] Masubuchi, K. Analysis of Welded Structures. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- [4] Kuzminov, S.A. Welding Deformations of Ship Structures. (in Russian), Leningrad, Sudostroenie, 1974.
- [5] Farkas, J. and Jármay, K. Analysis and Optimum Design of Metal Structures. Balkema, Rotterdam-Brookfield, 1997.
- [6] Farkas, J. and Jármay, K. Analysis of some methods for reducing residual beam curvatures due to weld shrinkage, *Welding in the World*, vol. 41, no. 4, pp. 385–398, 1998.
- [7] Eurocode 3, Design of steel structures, Brussels, CEN 2009.
- [8] Eurocode 9, Design of aluminum structures, Brussels, CEN 2007.
- [9] Burgolya I.: Optimalizálás evolúciós számításokkal, Typotex kiadó, Budapest, 2012
- [10] Xia Z., Wang Y., Wang Q., Mei C.: GPU parallel strategy for parameterized Ism-based topology optimization using isogeometric analysis, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.:56, No.:2, (2017), pp. 413-434 doi: 10.1007/s00158-017-1672-x
- [11] Kalavarapu V., Winer E.: A study of graphics hardware accelerated particle swarm optimization with digital pheromones, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol: 51, No.: 6, (2015), pp. 1281-1304, doi: 10.1007/s00158-014-1215-7
- [12] Cheng J., Grossman M., McKercher T.: Professional CUDA C programming, John Wiley and Sons Inc., Indianapolis, 2014
- [13] Shugen Xu, Renchao Wei, Weiqiang Wang, Xuedong Chen: Residual stresses in the welding joint of the nozzle-to-head area of a layered high-pressure hydrogen storage tank, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 21, 2014.
- [14] Ziolkowska, M., Wardzińska, D.: Corrosiveness of Fuels During Storage Processes, February 4th 2015, DOI: 10.5772/59803
- [15] LastFire project update - Large Atmospheric Storage Tank Fire Project: Incident survey for 1984-2005 (Final 2006 edition), LastFire update project, UK, 2006. p.19.
- [16] Hildebrand, J., Werner, F.: Change of Structural Condition of Welded Joints Between High-Strength Fine-Grained and Structural Steel, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004. Vol. X, No. 2, pp 87-95
- [17] Spong, M.W., Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. Robot modeling and control. 2006.
- [18] Craig, J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. Pearson Education India, 2009.
- [19] Ghafil, H.N. and Jármay, K. Optimization for Robot Modelling with MATLAB. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40410-9> Cham: Springer, 2020.
- [20] Lee, C.S.G. A Geometric Approach In Solving the Inverse Kinematics of PUMA Robots—College of Engineering. College of Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1983.
- [21] Ghafil, H.N. and Jármay, K. Dynamic differential annealed optimization: New metaheuristic optimization algorithm for engineering applications, *Appl. Soft Comput.*, p. 106392, 2020.
- [22] Jiang, Y., Hu, T., Huang, C. and Wu, X. An improved particle swarm optimization algorithm, *Appl. Math. Comput.*, Vol. 193, No. 1, pp. 231–239, 2007.
- [23] Whitley, D., A genetic algorithm tutorial, *Stat. Comput.*, Vol. 4, No. 2, pp. 65–85, 1994.
- [24] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., and Lewis, A., Grey wolf optimizer, *Adv. Eng. Softw.*, Vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [25] Al-Saedi, F.A.T., and Mohammed, A.H., Design and Implementation of Chess-Playing Robotic System, *Int. J. Sci. Eng. Comput. Technol.*, Vol. 5, No. 5, p. 90, 2015.
- [26] Bi, Z. M., Gruver, W. A., Zhang, W.-J., and Lang, S. Y. T., Automated modeling of modular robotic configurations, *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 54, No. 12, pp. 1015–1025, 2006.
- [27] Jármay K., Voith K. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 3. VAE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_41, 558 p.
- [28] Cservenák Á., Simulation and Modeling of a DC Motor Used in a Mobile Robot, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 18: No. 4 pp. 183-190, (2020)

NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK FIZIKAI SZIMULÁCIÓVAL ELŐÁLLÍTOTT HŐHATÁSÖVEZETEINEK TÖRÉSMECHANIKAI VIZSGÁLATAI

FRACTURE MECHANICAL ANALYSIS OF PHYSICALLY SIMULATED HEAT AFFECTED ZONES IN HIGH STRENGTH STEELS

Koncsik Zsuzsanna

Miskolci Egyetem, 3515

Miskolc, Egyetemváros,

Anyagszerkezzetani és

Anyagtechnológiai Intézet

zsuzsanna.koncsik@uni-
miskolc.hu

Lukács János

Miskolci Egyetem, 3515

Miskolc, Egyetemváros

Anyagszerkezzetani és

Anyagtechnológiai Intézet

janos.lukacs@uni-
miskolc.hu

†Nagy Gyula

Miskolci Egyetem, 3515

Miskolc, Egyetemváros

Anyagszerkezzetani és

Anyagtechnológiai Intézet

A kutatómunka során termomechanikus hengerléssel előállított nagyszilárdságú acél (Voestalpine Alform 960M) hőhatásövezeti zónáinak törésmechanikai vizsgálatát végeztük el. A megfelelő hőhatásövezeti zónák előállításához Gleeble 3500 fizikai szimulátort alkalmaztunk, különböző típusú hőciklussal és hűlési sebességgel. A szimulációt követően kritikus repedés-kinyílás (CTOD vagy δ) meghatározását célzó törésmechanikai vizsgálatot végeztünk a próbatesteken.

During the research work the fracture mechanical investigation of heat affected zones of thermomechanically rolled high strength steels (Voestalpine Alform 960M) were carried out. For production of appropriate heat affected zones Gleeble 3500 physical simulator was applied, with different heating cycles and specific cooling times. Following the simulation, fracture mechanical investigations were performed, in favour of determination crack tip opening displacement (CTOD or δ) values.

1. Bevezetés

A korszerű nagyszilárdságú acélok felhasználása a járműiparban jelentős. Ezeknek köszönhetően csökkenthető az alkalmazott falvastagság, amely együtt jár a tömeg csökkenésével, a szükséges hegesztett varratok csökkenésével [1], [2], [3], közvetlenül és közvetetten az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkenésével [4]. A szilárdságnövelés leghatékonyabb módja a szemcseméret csökkentése. Az 1970-es években egy új módszert fejlesztettek ki, a termomechanikai hengerlést, amely segítségével különösen nagy szilárdság és jó hegeszthetőségi tulajdonságok érhetők el; a folyáshatár a kémiai összetétel változtatása nélkül növelhető, a hengerlési paraméterek megfelelő megválasztásával. A fejlesztések mind az acélgártás, mind a hengerlés, mind pedig az alkalmazások terén azóta is töretlenek [5], [6], [7].

Meg kell azonban jegyezni, hogy az előnyös szilárdsági tulajdonságok mellett ezek az acélok gyakran tartalmaznak anyagfolytonossági hiányokat, a felhasználás közben keletkezhetnek bennük repedések, így a terhelés közbeni viselkedésük csak a törésmechanikai szemléletmóddal jelezhető előre. Ezen kívül, nemcsak az alapanyag, hanem a hegesztett szerkezet maga is fontos a tervezőmérnök számára. Számos esetben nem lehetséges bizonyos hőhatásövezeti területek vizsgálata a valódi hegesztett kötésben, mert a hegesztési folyamat hőgradiense olyan nagy, hogy erősen inhomogén, akár tízed mm-enként változó mikroszerkezet jön létre. Fizikai szimuláció alkalmazásával nagy számú homogén szerkezetű minta készíthető, amelyek alkalmasak további mechanikai vizsgálatokra, mint például ütővizsgálat, törésmechanikai vizsgálatok, vagy mikroszerkezeti vizsgálatok [8], [9].

A korszerű nagyszilárdságú anyagoknak van továbbá egy olyan előnyük is, hogy nagy(obb) szívóssággal rendelkeznek. Ebből az is következik, hogy hagyományos törési szívósság értékek (érvényes K_{IC}) nem határozhatók meg a szívós viselkedés miatt, így – a jelenleg érvényes ISO 12135 szabványnak megfelelően – a kritikus repedés-kinyílás (CTOD vagy δ) kerül előtérbe a szimulációval létrehozott hőhatásövezetben.

A jelen közleményben bemutatásra kerülő vizsgálatok egy nagyobb kutatási témába illeszkednek, amelynek fókuszában a hegesztés által okozott szívósság csökkenés vizsgálata szerepel [10], [11], [12], [13], [14], [15]. A hosszú távú cél a csökkent szívósságú hőhatásövezetek törésmechanikai anyagjellemzőinek a meghatározása, fizikai szimulációval létrehozott próbatesteken. A korábbi hegesztéstechnológiai kutatások során a ridegebb hőhatásövezeti zónákban jelentős ütőmunka csökkenés következett be az S960M anyagminőségű alapanyagon. Ezért a vizsgálatok első lépésében a törésmechanikai vizsgálatokat az alapanyagon végeztük el, szobahőmérsékleten és negatív hőmérsékleten egyaránt [16], [17], [18]. A kísérleti munka most bemutatásra kerülő, második része már fizikai szimulációval előállított hőhatásövezeti zónákban történt.

2. Kísérleti munka

2.1 Vizsgálati körülmények

A kísérleti munka során 15 mm falvastagságú lemezből munkáltunk ki próbatesteket, amelyek geometriája 10×10×70 mm volt, megfelelő felületi érdességgel. Az alkalmazott S960M anyagminőségű próbatestek kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

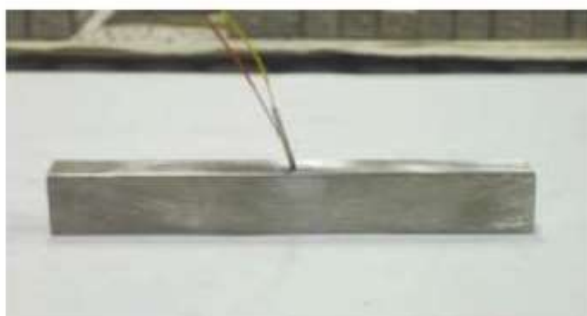
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,14	0,30	1,13	0,007	0,001	0,3	0,04	0,167
V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	–
0,011	0,003	0,01	0,034	0,001	0,002	0,003	–

1. táblázat

A vizsgált anyagminőség kémiai összetétele

A Voestalpine műbizonylata alapján a vizsgált anyagminőség mechanikai tulajdonságai: $R_{p0,2} = 958$ MPa, $R_m = 1058$ MPa és $A_5 = 16,9\%$ [19].

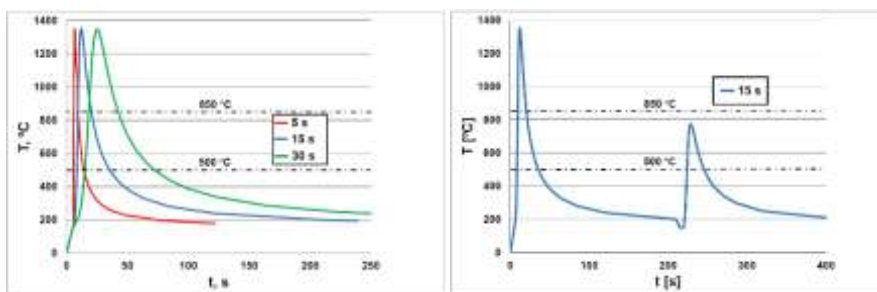
A hőhatásövezeti zónák szimulációjához Gleeble 3500 fizikai szimulátort alkalmaztunk. Az alkalmazott próbatest és a szimulációhoz ráhegesztett K típusú hőelem (NiCr-Ni) látható az 1. ábrán.



1. ábra

A próbatest és a hőelem

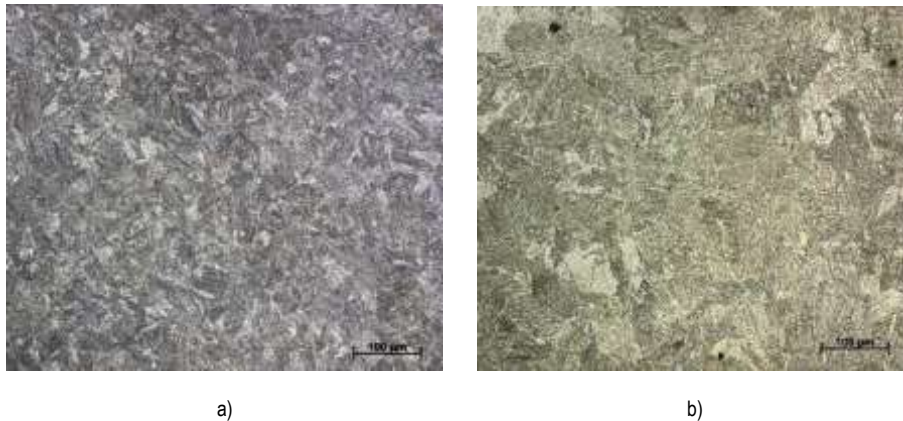
A hegesztési paraméterek és a hűlési időintervallum meghatározásához a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést vettük alapul. A hőciklusok tervezése során a Rykalin 3D modellt [20] alkalmaztuk, a csúcshőmérséklet 1350°C volt. A vizsgálatok során három különböző hűlési időt állítottunk be, ahhoz, hogy szimulálni tudjunk egy kis, egy közepes és egy nagy vonalenergiával történő huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést. Ez alapján a választott hűlési időintervallumok: $t_{8,5/5} = 5$ s, 15 s és 30 s voltak. Az interkritikusan megeresztett durvaszemcsés zóna létrehozásához egy további hőciklust is alkalmaztunk, 775°C csúcshőmérséklettel. A szimulációs hőciklusokat a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra

A Gleeble szimuláció hőciklusai

Minden hőciklust 4-4 próbatesten végeztük el, ezek közül 3-3 próbatestet vetettünk alá később a törésmechanikai vizsgálatoknak, 1-1 próbatesten pedig a szimuláció sikerességét ellenőriztük a mikroszerkezet vizsgálatával és keménységméréssel. A két, szélsőséges szimulációs minta szövetszerkezetét mutatja a 3. ábra. Az a) ábrarészlet a gyors hűtés hatására kialakult finomabb szemcsézetű mikroszerkezetet, míg a b) ábrarészlet a lassabb hűlés hatására kialakult durvább szemcsézetű mikroszerkezetet mutat.



3. ábra
Mikroszerkezeti felvétel a) $t_{8,5/5}=5$ s, b) $t_{8,5/5}=30$ s hűlési intervallumok esetén, $N=200\times$

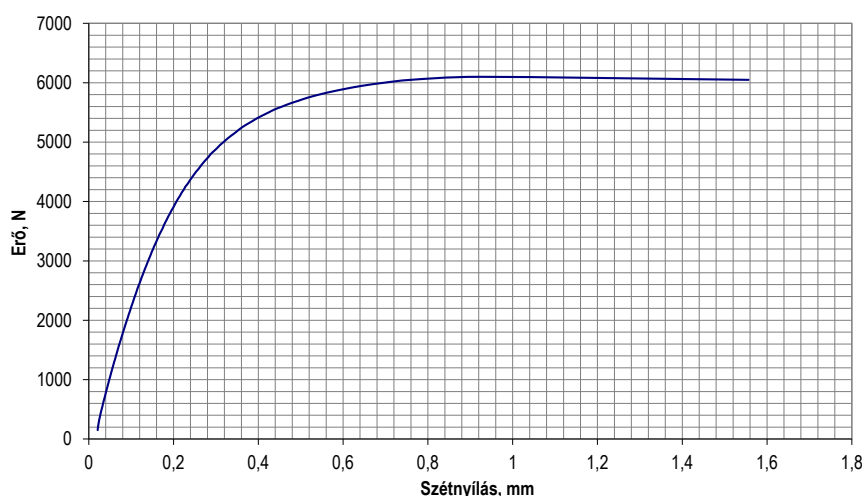
A HV1 keménységmérés a keménység értékének kismértékű csökkenését mutatta; az átlagos keménység értéke 340 HV1 (szórási együttható: 3,3%) volt a $t_{8,5/5}=5$ s hűlési idő esetén, 325HV1 (szórási együttható: 2,3%) a $t_{8,5/5}=15$ s hűlési idő esetén, és 273 HV1 (szórási együttható: 5,8%) a $t_{8,5/5}=30$ s hűlési idő esetén.

A törésmechanikai vizsgálatokra, illetve az eredmények kiértékelésére a jelenleg érvényben lévő ISO 12135 szabvány [21] előírásai alapján került sor. A vizsgálatokhoz a próbatesteken Chevron-bemetszést végeztünk, a hőhatással különösen érintett, homogénnek tekinthető, középső szakaszon. A bemetszést követően a próbatesteket előfárasztottuk, a maximális előfárasztási erő 3160 N volt. Az előfárasztást 9-14 lépésben végeztük el, amíg a fáradásos repedés el nem érte a megfelelő hosszat a felületen.

A kritikus repedés-kinyílás értékének meghatározásához hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztünk (TPB), szobahőmérsékleten, MTS 810.2 típusú univerzális anyagvizsgáló berendezésen, az Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet laboratóriumában. A hajlító görgek sugara 5 mm, az alkalmazott vizsgálati sebesség 0,05 mm/s, a terhelési mód pedig statikusan növekvő volt. A mérésekhez MTS 632.02C típusú szétnyílásmérőt használtunk, amelyet a bemetszés két oldalára rögzítettünk. A mérés során a kontrollált változó a dugattyú elmozdulás volt. A vizsgálat során rögzítettük az elmozdulás, az alkalmazott terhelőerő és a szétnyílás értékeit.

2.2 Vizsgálati eredmények

A hárompontos hajlítóvizsgálat során rögzített erő és szétnyílás értékek alapján megrajzolt diagramok mindegyike maximumos jelleget mutat, lásd 4. ábra.



4. ábra
Tipikus erő-szétnyílás diagram

A vizsgálatokat követően, a próbatestek töretfelületét elszíneztük, 250°C-os kemencében, egy órás hőntartást alkalmaztunk, majd a lehűlt próbatesteket nagy sebességgel, ridegen eltörtük azokat. Az 5. ábrán bemutatott töretfelületeken jól látszik a

hevítéssel való elszínezés eredménye. Minden próbatesten a különböző típusú repedéshosszakat (kiinduló repedéshossz: a_0 , stabil repedésnövekmény: Δa) ezeken a töretfelületeken, 9-9 helyen mértük meg.



5. ábra

1. számú próbatest töretfelülete a hevítéssel való elszínezést követően

A kiindulási adatok (S , W , B , B_N , $R_{p0,2}$, E , z), a görbéből leolvasható jellemzők (V_p), és töretfelületen mérhető geometriai jellemzők (a_0 , Δa) ismeretében, az ISO 12135 szabvány alapján, a következő módon számítható ki a kritikus repedés-kinyílás (CTOD vagy δ) értéke:

$$\delta_0 = \left[\frac{S}{W} \cdot \frac{F}{(B B_N W)^{0.5}} \cdot g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \cdot \frac{1 - \nu^2}{2 R_{p0,2} E} + \frac{0,4(W - a_0)}{0,6 a_0 + 0,4 W + z} \cdot V_p \quad (1)$$

ahol

S : az alátámasztások közötti távolság;

W : a próbatest szélessége;

F : a jelentősnek ítélt pop-in helyén, vagy a maximumnál leolvasott erő értéke;

B : a próbatest vastagsága;

B_N : a próbatest nettó vastagsága, az oldalirányú repedésterjedés közötti részen;

g_1 : geometriai függvény, értéke kiolvasható az ISO 12135 szabvány [15] mellékletéből, adott a_0 és W érték hányadosa alapján;

ν : Poisson-tényező, 0,29;

$R_{p0,2}$: folyáshatár a vizsgálati hőmérsékleten, 958 MPa;

E : rugalmassági modulus a vizsgálati hőmérsékleten, 201500 MPa;

a_0 : kezdeti repedésméret;

z : szétnyílásmérő rögzítésére szolgáló alkatrész vastagsága, elhanyagolható;

V_p : bemetszés-szétnyílás képlékeny komponense, a teljes erő-szétnyílás diagramból származtatjuk.

A különböző hőciklusokkal szimulált minták törésmechanikai vizsgálatának eredményeit, vagyis a CTOD vagy a δ_0 értékét, a 2. táblázat foglalja össze. Az egyetlen hőciklussal szimulált minták esetében 3-3 megbízható eredményt tartalmaz a táblázat, a két hőciklussal szimulált minták esetében azonban csak 2-2 mérést. Ez utóbbi vizsgálatok esetében egy-egy mintánál rendre jelentkezett valamilyen mérési bizonytalanság (lepattant a szétnyílásmérő, megcsúszott a görgő), így megbízhatónak csak 2-2 eredményt tekinthetünk.

Próbatest azonosítás			W, mm	F, N	B, mm	a_0 , mm	a_0/W , –	V_p , mm	δ_0 , mm	δ_0 átlag, mm
1350 °C	5 s	1	9,91	9253	9,85	3,88	0,39	0,39	0,17	0,22
		2	10,02	9100	10,01	4,00	0,40	0,71	0,28	
		3	10,00	9300	9,85	3,97	0,40	0,51	0,21	
	15 s	6	9,93	7600	9,94	3,91	0,39	0,64	0,26	0,29
		7	9,92	7200	9,94	4,02	0,40	0,76	0,29	
		8	9,89	9075	9,85	3,76	0,38	0,74	0,31	
	30 s	9	9,95	9451	9,93	3,91	0,39	0,59	0,24	0,25

		10	9,97	6600	9,97	4,01	0,40	0,65	0,25	
		11	9,93	6100	9,95	3,95	0,40	0,64	0,25	
1350 °C és 775 °C	5 s	14	9,93	4852	10,02	3,95	0,40	0,38	0,15	0,15
		15	10,01	5251	10,01	4,04	0,40	0,39	0,15	
	15 s	17	9,93	6601	9,93	3,91	0,39	1,19	0,46	0,40
		18	9,91	4300	9,96	3,91	0,39	0,87	0,34	
	30 s	21	9,93	5150	9,95	3,96	0,40	0,66	0,26	0,27
		22	9,94	4352	9,95	3,91	0,39	0,75	0,29	

2. táblázat

A különböző módon szimulációval létrehozott hőhatásövezeti zónák kritikus repedés-kinyílás értékei

A 2. táblázat utolsó oszlopában az azonos paraméterű szimulációval elkészített hőhatásövezeti zónák kritikus repedés-kinyílási értékeinek átlagát láthatjuk. A δ_0 index pontosítható a görbén látható viselkedés, valamint a [21] szabvány értékelési szempontjai alapján, mivel minden esetben a minták maximumos viselkedést mutattak, így minden vizsgált próbatestre a kritikus repedés-kinyílás mérőszáma δ_m lesz. Az átlagértékek vonatkozásában azonban nem vonhatunk le egyértelmű következtetést, ugyanis nincs egy megfigyelhető tendencia a növekvő $t_{8,5/5}$ hűlési idők és a δ_m értékek között. Megállapítható azonban, hogy a legkisebb δ_m értékek a $t_{8,5/5}=5$ s hűlési időhöz tartozik, akkor is, ha egy és akkor is, ha két hőciklust alkalmazunk a szimuláció során, továbbá, hogy a legnagyobb δ_m értékek a $t_{8,5/5}=15$ s hűlési időkhöz tartoznak, szintén mindkét esetben. Összességében azonban az is megállapítható, hogy a különböző szimulációkkal létrehozott, különböző mikroszerkezetű hőhatásövezeti zónák δ_m törésmechanikai mérőszámai nem térnek el jelentős mértékben egymástól.

Maga a törésmechanikai vizsgálat – a hárompontos hajlítóvizsgálat szétnyílásmérő alkalmazásával – néhány percet vesz igénybe. Azonban, ha a próbatest előkészítését, és a vizsgálat után mérendő jellemzők mérését, kiértékelését is beleszámítjuk a vizsgálatba, akkor egy próbatest törésmechanikai vizsgálata körülbelül 1,5-2 nap. Ráadásul, egy nagyszilárdságú anyag megmunkálása költséges eljárás is. A hosszú vizsgálati idő, illetve a próbatestek nagyobb gyártási költsége miatt igyekszünk minél kisebb számú próbatestből megbízható eredményeket szolgáltatni. A megbízhatóságot növeli a vizsgálati eredmények kiértékelését követően a [21] szabvány szerint megadott feltételek teljesülésének az ellenőrzése.

A jelen vizsgálatra vonatkozóan az előírt feltételek [21] közül teljesülnek a próbatest geometriájára, annak felületi érdességére, a mérőberendezés pontosságára, megbízhatóságára, és a fáradásos előrepereszítés feszültségintenzitási tényezőjére vonatkozó feltételek. Nem, vagy csak helyenként teljesülnek a repedés megjelenésére vonatkozó feltételek, úgy, mint például az a feltétel, hogy a fáradásos előrepereszítés frontvonala és a bemetszés hossza közötti távolság legyen nagyobb, mint a minimális 1,2 mm (ez általában kisebb érték); illetve, hogy a 7 belső végső repedéshossz egyike sem tér el $0,10 \cdot (a_0 + \Delta a)$ értéktől nagyobb értékkel a 9 ponton mért végső repedéshossz átlagától (ez az érték változó).

Összehasonlítva az eredményeket az alapanyagon, szintén szobahőmérsékleten mért eredményekkel [16], megállapítható, hogy annál több esetben előfordult pop-in (hirtelen ugrás, majd esés az erő értékében), ilyenkor a δ típusa δ_c , értéke pedig 0,2 mm alatti volt. Azokban az esetekben azonban, ahol az alapanyagon mért δ típusa δ_m volt, annak értéke 0,16...0,29 mm között változott, de jellemzően 0,2 mm fölötti volt.

3. Összegzés

Jelen kutatómunka S960M anyagminőségű, termomechanikusan hengerelt acél fizikai szimulációval létrehozott hegesztési hőhatásövezeteinek törésmechanikai vizsgálatait mutatja be. A Gleeble 3500 fizikai szimuláció során a Rykalin 3D modell megfontolásait alkalmaztuk. A megválasztott hűlési idők: $t_{8,5/5} = 5$ s, 15 s és 30 s voltak, a csúcshőmérséklet 1350°C, illetve két ciklus alkalmazása esetén egy további alacsonyabb hőmérséklet 775°C, a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés szimulálása érdekében.

A korszerű, nagyszilárdságú acéloknak megvan az az előnyös tulajdonsága, hogy nagy szívóssággal is bírnak, így a hagyományos, lineárisan rugalmas törésmechanikai mérőszámok (mint K_{Ic}) nem alkalmazhatók az esetükben. A vizsgálatok során kritikus repedés-szétnyílás (CTOD, vagy δ) mérőszám meghatározására került sor.

A vizsgálatok minden hőhatásövezeti zóna esetében δ_m típusú mérőszámot állapítottak meg, annak értéke nem változott jelentősen a különböző hűlési időket alkalmazva. A lekisebb δ_m érték a $t_{8,5/5}=5$ s esetén volt tapasztalható, míg a legmagasabb érték a $t_{8,5/5}=15$ s esetén jelentkezett. Összehasonlítva a vizsgálati eredményeket és a próbatestek viselkedését az alapanyagon tapasztaltakkal, nem kaptunk jelentős szívósságbeli eltérést a szimulált próbatesteken, vagyis a feltételezett hegesztett kötés hőhatásövezetében.

Kimondható ugyanakkor, hogy a nagyszilárdságú, termomechanikusan hengerelt acél mikroszerkezeti inhomogenitása, illetve a szimuláció által létrehozott hőhatásövezet mikroszerkezeti sajátossága egyértelműen befolyásolja a törésmechanikai vizsgálat eredményét. A megbízhatóbb eredmény érdekében, további párhuzamos vizsgálatok elvégzése szükséges.

Irodalomjegyzék

- [1] Dobosy Ádám, Lukács János: The effect of welding parameters on the properties of thermomechanically rolled high strength steels, The Publications of the MultiScience - XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, 2016. Paper D2_3.. ISBN:978-963-358-113-1, 8 p.
- [2] Willms, R.: High strength steel for steel constructions, Nordic Steel Construction Conference, publication, 2009, pp. 597-604.
- [3] Májlínger Kornél., Borók Alexandra, Pasquale, R. S., Varbai, Balázs: TIG welding of advanced high strength steel sheets, International Scientific Conference On Advances In Mechanical Engineering, 3-15 October 2016, Debrecen, Hungary, ISCAME Proceedings, pp. 313-318.
- [4] Strategic Research Agenda (SRA). European Steel Technology Platform (ESTEP), <https://www.estep.eu/assets/SRA-Update-2017Final.pdf> (Utolsó aktualizálás: 2017. szeptember 5.; letöltés: 2020. december 31.)
- [5] Shikanai Nobuo, Mitao Shinji, Endo Shigeru: Recent Development in Microstructural Control Technologies through the Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) with JFE Steel's High-Performance Plates. JFE Technical Reports-No.11, June 2008. pp. 1-6.
- [6] Masahiro Toyosada: Characteristics of TMCP steels and their welded joints used for hull structures. Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, May 26-31, 2002, pp. 385-391.
- [7] Kimura Tatsumi, Yamamoto Kouki, Aoki Hidemi: Development of High Strength H-Shapes with Excellent Toughness Manufactured by Advanced Thermo-Mechanical Control Process (TMCP). JFE Technical Reports-No.16, March 2011. pp. 52-57.
- [8] Koncsik Zsuzsanna; Fótos Réka; Lukács János: A fizikai szimuláció és alkalmazása az anyagtechnológiákban. In: Pokorádi, László (szerk.) Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, 2012 konferencia előadásai, 2012, pp. 211-217.
- [9] Balogh, András; Lukács, János ; Török Imre (szerk.): Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai: Kutatások járműipari acél és alumíniumötvözet anyagokon. Miskolci Egyetem, Miskolc, 2015., 324 p.
- [10] Gáspár Marcell: Nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéstechnológiájának fizikai szimulációra alapozott fejlesztése. PhD értekezés, Miskolc, 2016., pp. 7-100.
- [11] Jámbor Péter: Termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acél hegeszthetőségének fizikai szimulációra alapozott elemzése, MSc Diplomamunka, Miskolc, 2016., pp. 24-34.
- [12] Gáspár Marcell: Nemesített nagyszilárdságú acélok hőhatásövezeti zónáinak előállítása szimulált hegesztési hőciklusok segítségével, Multidiszciplináris tudományok, 3. kötet. 2013., 1. sz. pp. 27-38.
- [13] Marcell Gáspár: Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel, Metals 2019, 9, 1226; doi:10.3390/met9111226
- [14] Raghawendra P.S. Sisodia, Marcell Gáspár: Physical Simulation-based Characterization of HAZ Properties in Steels. Part 1. High-Strength Steels and their Hardness Profiling, Strength of Materials, Vol. 51, No. 3, May, 2019. pp. 490-499.
- [15] Marcell Gáspár, Raghawendra P.S. Sisodia, Ádám Dobosy: Physical Simulation-based Characterization of HAZ Properties in Steels. Part 2. Dual-phase Steels, Strength of Materials, Vol. 51, 2019. No. 5,
- [16] Zsuzsanna Koncsik; Gyula Nagy; János Lukács: COD assessment of S960M grade steel at different temperatures, In: 72nd IIW Annual Assembly and International Conference: Proceedings of International Conference, Prága, Csehország, 2019. Paper: IIW-DOC X-1958-19, 12 p.
- [17] Zsuzsanna Koncsik: Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches, In: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development, (ICESSD 2019) London, Egyesült Királyság / Anglia : CRC Press 2019, 394 p. pp. 316-324. 9 p.

- [18] Koncsik Zsuzsanna; Lukács Zsolt: Fracture mechanical analyses of high strength steels applying experiments and simulation, IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 903. 2020 p. 012013, 9 p.
- [19] Manufacturer self-certification, Delivery Note Nr.: 4117479/21. 11. 2014, p1.
- [20] Rykalin, "Teplovüe processzi pri szvarke" Vüpuszk 2 Izdatelsztvo Akademii Nauk SzSzSzR, Moszkva, 1953. pp. 56.
- [21] ISO 12135:2016 International Standard, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness.

KORROZIÓÁLLÓ ACÉLOK SZÖVETSZERKEZETÉBEN VÉGBEMENŐ VÁLTOZÁSOK A LÉZERSUGARAS HEGESZTÉSI PARAMÉTEREK FÜGGVÉNYÉBEN

LASER WELDING PARAMETERS EFFECTS ON MICROSTRUCTURE OF CORROSION RESISTANCE STEEL

Kovács Ferenc

Egyetem Bánki Donát Gépész és
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,
1081, Budapest, Népszínház utca 8.
kovacsferi1996@gmail.com

dr. Fábián Enikő Réka

Egyetem Bánki Donát Gépész és
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,
1081, Budapest, Népszínház utca 8.
fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Absztrakt Az automatizálás iránti igény a lézersugaras megmunkálások felé tereli a technológiai fejlődést. A vizsgálat tárgya az ausztenites vékonylemezek hegesztése dióda-lézer sugárforrással berendezéssel. Hozaganyag nélkül a varratok ferrittartalma csökken a hegesztési sebesség növelésével. A varratok keménysége nő az alapanyaghoz képest. Korróziós tesztelés megmutatta, hogy a lézersugaras hegesztés során a kisebb hőbevitel kevesebb lyukkorróziós fogyást okoz.

Abstract

The development of automation is driving technological advances towards laser beam machining. The subject of the study is the diode-laser beam welding effect on thin austenitic stainless sheets. There were observed that ferrite content of weld metal decreased with increasing the welding speed during to autogenous laser welding. The hardness of weld metal increased comparing to base material. Corrosion testing has shown that lower heat input during laser beam welding causes less hole corrosion loss.

1. Bevezetés

A lézersugaras megmunkálásokat nagy érdeklődés veszi körül, hiszen még számos kiaknázatlan területe van a műszaki világ előtt. A lézersugaras hegesztés pontosságával, ismétlési pontosságával és tiszta, biztonságos körülményeivel méltán tűnik ki a klasszikus hegesztőtechnológiák közül. Ezzel a technológiával hegesztve általában nagyon keskeny a hőhatásövezet, így nem jön létre széles szemcsedurvulási sáv. A technológia ismert hátránya az előkészítés minőségére való érzékenység. A lézersugaras hegesztés megfelelő kivitelezhetősége érdekében a hegesztendő lemezek pontos illesztésére van szükség

Fontos a felület megfelelő sugárelnyelő képessége.

A lézersugaras hegesztőgépek alkalmazhatóságát tulajdonságaik, azokat pedig sugárforrásuk határozza meg, ugyanis a különböző sugárforrások különböző hullámhosszú fényt bocsátanak ki. A lézerefény abszorpciója biztosítja a hőátadást, amivel a kívánt megmunkálás megtörténhet. A lézersugaras hegesztéseknél az energia elnyelődés és a hőátadás típusa szerint két hatásmechanizmust különböztetünk meg, a mélyvarratos hegesztést és a hővezetési hegesztést. A mélyvarratos hegesztés könnyen felismerhető a jellegzetes mély, répa alakú beolvadásról. A hővezetési hegesztési varrat alakjának hosszúság/szélesség aránya sokkal egyenletesebb, az irodalom fél lencse alakúnak nevezi és rendszerint csak keskenyebb varrat készülhet így, hiszen a munkadarab felületére jutó energia hővezetéssel jut mélyebb rétegekbe [1,2]. A mélyvarratos változat sugárforrása jellemzően a szén-dioxid-lézer és a Nd:YAG- lézerek. A hegesztési sebesség kisebb, mint 12 m/min, a hegeszthető lemezvastagság nem éri el a 25 mm-t. Acélok hegesztésekor ezeknél a lézerforrásoknál a lézersugárzás intenzitása nagyobb, mint 10^6 W/cm^2 . Így hegeszthetőek ötvözetlen és erősen ötvözött acélok, az alumínium, valamint ötvözetek és a réz, valamennyi ötvözetével. A hővezetési eljárás jellegzetes sugárforrásai a Nd:YAG-lézerek, a szálalézer és a diódalézer, mely kutatásunk tárgyát képezi. A diódalézer $0,94 \mu\text{m}$ hullámhosszával hozaganyag nélkül csak keskeny varratok hegesztésére lehet alkalmas, az áthegesztett keresztmetszet mérete bizonyos mértékig a lézerforrás-teljesítménnyel növelhető [3.], továbbá a fókuszolt méretének és alakjának helyes beállításával szintén változik az átolvadás mélysége.. Hozaganyag használatával, felrakóhegesztés jellegű építkezéssel természetesen szinte korlátlan méretű varratok készülhetnek. A diódát használó lézergépekkel kapcsolatban fontos megemlíteni, hogy a populáció inverzió különösen nagy áramsűrűséget igényel, így a gerjesztendő anyagot rendszerint kis térfogatúra készítik. Az így kapott kis egységeket

modulokba lehet rendezni és akár egy robotkar végére telepíteni, így igen kis helyet foglal, mely jelentős költségcsökkenést jelent. Nincsen lézergáz, ez további hosszú távú megtakarítási lehetőség.

A lézersugaras eljárások közös tulajdonsága, hogy a hőbevitelt és a hőelvitelt az abszorpciós és geometriai viszonyok is befolyásolják. Ahogy azt az irodalmi adatok mutatják [4] acéloknál a CO₂ lézersugaras kezeléskor a lézersugár abszorpciója 10% körül, míg diódlézer alkalmazásával ez 30%-ra nő. A felület minősége szintén jelentősen befolyásolja a lézersugár abszorpciós tényezőjét, de míg a CO₂ lézersugaras kezeléseknél 4-80% között változik, addig a szilárdtest lézersugaras kezeléseknél még polírozott felületnél is eléri a 30%-ot [5]. Minden előnyös tulajdonság ellenére a diódlézer alkalmazása ritka a hegesztésben, kutatásával új kiaknázatlan lehetőségekre bukkanhatunk.

2. Vizsgálati anyag és technológiák

A kísérletben az 1.4404 számjelű ausztenites korrózióálló acélt használtuk, mely az MSZ EN X2CrNiMo 17 13 2 néven jelöl. Ez a molibdénnel is ötvözött ausztenites korrózióálló acél számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik, mint például: hidegen jól alakítható, jól hegeszthető, 400 °C-ig ellenáll a kristályközi korróciónak. A molibdénnek köszönhetően jól ellenáll a klórion tartalmú anyagoknak és a nem oxidáló savaknak. Más ausztenites minőségekhez képest olcsó, így gyakran alkalmazzák vegyipari és textilipari gépek építéséhez. Engedélyezett a használata nyomástartó edényekhez is, sőt a 2000-s években már hídépítés során is alkalmazták.

Az elvégzett vizsgálatok célja 1,5mm vastagságú lemezek diódlézeres hegesztőberendezéssel létrehozott hegesztett kötések tulajdonságainak vizsgálata volt. A hegesztést 3KW teljesítményű humanoid kialakítású Reis diódlézeres hegesztőrobottal végeztük. A lézer típusa LDL 130-3000. A hullámhossz 940 nm. Az alkalmazott LDL 130-3000 típusú lézersugaras berendezésnél a sugárforrás energiaeloszlása erősen gausszos, a fókusz ovális alakot vesz fel, hosszirányban 3 mm hosszú, keresztirányban 1 mm széles. A varrat védelmét argon gázzal biztosítottuk, melynek hozama 15 l/ perc volt a korona oldalon és 10 l/perc a gyök oldalon. A fúvóka 30°-s szöget zárt be a munkadarabbal. A lézervarratok készítésekor monitoron követhető a hegfürdő hőmérséklete, mely végig 1400°C és 1500°C között volt. A lézersugár leállásakor a varrat hőmérséklete nagy sebességgel csökkent, gyorsan érinthetővé vált a darab.

3. Anyagvizsgálat és eredmények

A vizsgálatok céljából a varratvégétől 25 mm-re vágtuk ki a 10x30mm méretű mintalemezeket metallográfiai vizsgálatra, majd a varrat középső tartományából 2-2 db 15x30mm méretű mintadarabot korróziós tesztelésre készítettünk elő. Vizsgáltuk a minták viselkedését pácolás nélkül illetve FERRO Korr pácpaszta használata után is.

A csiszoláshoz P60-s, méhsejtes P240-s, P600-s, P1200-s és P2500-s szilíciumkarbid bázisú csiszolókorongokat használtam, majd políroztam 3 µm és 1 µm-s gyémántsuszpenzió alkalmazásával MD Nap típusú polírkorongon. Mivel az ausztenites anyagok rendkívül érzékenyek az előkészítésre szükséges volt a polírozást 0,3 µm és 0,05 µm -es szemcsefinomságú AlO₃ bázisú szuszpenzió használata is.

Metallográfiai vizsgálataink során több marószert is kipróbáltunk. A Kalling'2 reagens hosszabb ideig tárolható, de az auszteites szerkezet kimutatására jobban működik a bekeverés után gyorsan tönkre menő királyvíz. A szövetszerkezet vizsgálatokat Neophot 2 mikroszkóp segítségével végeztük

A ferrittartalom mérésre a mágneses indukciós elven működő Fischer FMP30 típusú ferritszkópot használtuk. Mértük a kész varraton korona és a gyök részt, valamint a csiszolatokon a varratok ferrit tartalmát.

Metallográfiai vizsgálataink során. Kalling'2 marószerezrel a szépen kirajzolódik a varrat jellege és a δ fázisokat is meg lehet különböztetni, de az alapanyag ausztenites szerkezete királyvizes maratással vált jobban láthatóvá.

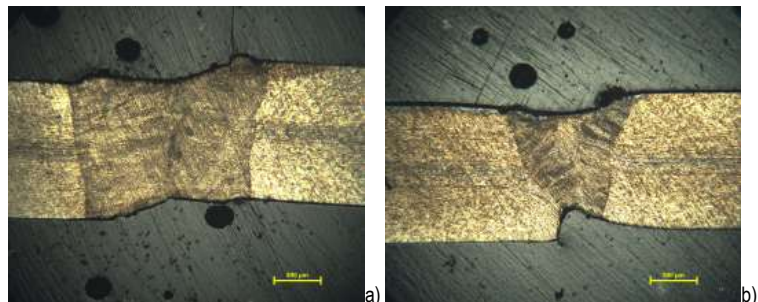
A mikrokeménység mérést 0,2 kg terheléssel végeztünk Zeiss típusú mikrokeménység mérővel

A korróziós tesztet az ASTM G48 szabvány B módszere szerint végeztük 6%-os FeCl₃ vizes oldatban.

3.1 Mikroszkópos vizsgálat

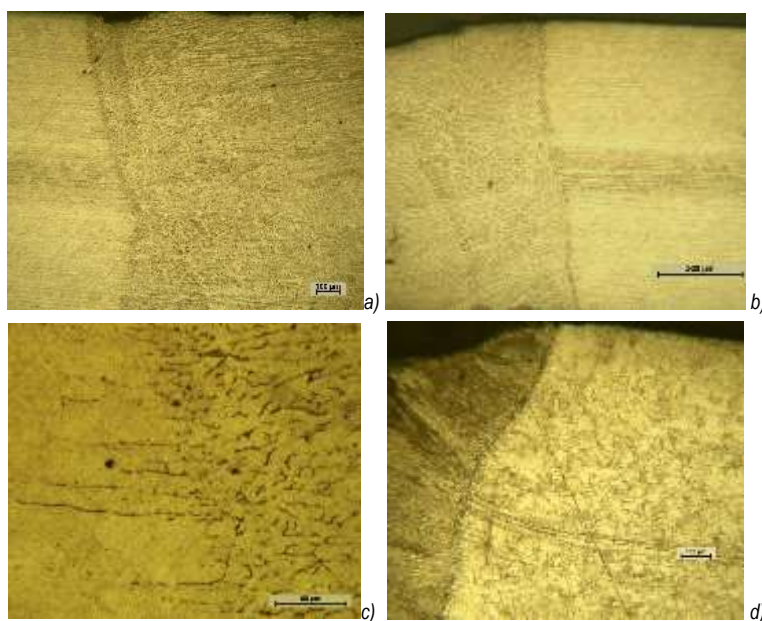
Az 1.5mm lemezvastagságú ausztenites korrózióálló lemezeknél dióda lézersugaras berendezéssel sikerült teljesen átolvadó

varratokat létrehozni hozaganyag használata nélkül. Megfelelően átolvadó varratokat, 1000-1200 W között teljesítménnyel, 4 mm/s és 8 mm/s közötti sebességgel tudtunk létrehozni. A bevitt energia meghatározó a varrat alak szempontjából. Ahogy azt az 1. ábrán is láthatjuk, 6 mm/s -os hegesztési sebesség mellett a lézersugár teljesítményt 1200W-ról 1000 W-ra csökkentve a varrat magasság/szélesség aránya $H/D=1/2$ -ről $H/D=5/3$ -re változott.



1. ábra. A lézersugár teljesítmény hatása a varrat alakra $v=6$ mm/s .Kalling'2 reagens
a) $P=1200W$ /b) $P=1000W$

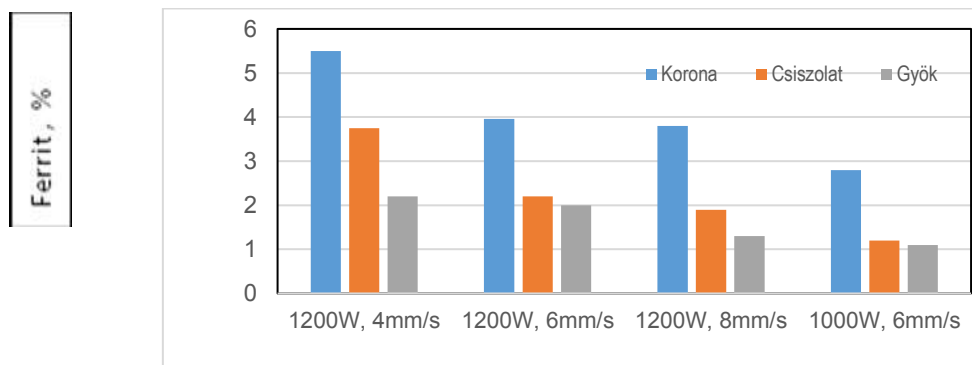
Kalling'2 reagenssel való maratás után a keresztirányú csiszolatokon szépen kirajzolódott a hegesztéssel létrehozott varratfém dendrites szerkezete, mely a varratfém középvonala felé irányulóan oszlopos struktúrát mutat, míg a varratfém hőhatászóna felé eső részén egyre rövidebb, szinte ekvixiális.



2. ábra. Fénymikroszkópos felvételek a varratok környezetében
a) 1200W, 4 mm/s; Kalling'2 reagens b) 1200W, 6 mm/s, Kalling' 2 reagens
c) 1200W, 6 mm/s hőhatásövezet; Kalling' 2 d) 1000W, 6 mm/s hőhatásövezet, királyvíz

3.2 Ferrit tartalom változás

Ahogy azt a fénymikroszkópos vizsgálatoknál is láttuk, Kalling 2 reagenssel maratva a mintákat, az alapanyagnál a lemez közepén egy keskeny tartomány erőteljesebb elszíneződés látható a lemez felületéhez közel eső zónákhoz képest, ami feltételezi lemezek közepén a delta ferrit relatív nagyobb mennyiségű megjelenését. A ferritszkópos vizsgálatok a lemez felületén nem, vagy csak alig (0,1%) mutattak ferritet, míg a csiszolaton a középvonalnál jellegzetesen 0,3% ferritet mértünk. A csiszolatokon, nagyobb nagyításban elkülönül a varratokban és a hőhatásövezetben a delta ferrit (2. ábra). Ferritszkóppal mérhető volt a varratok ferrittartalma, úgy a csiszolatokon, mint a hegesztés után. A varratok gyök részénél a kisebb teljesítmények mellett lehet oly keskeny csak a varrat zóna, ahol mérési bizonytalanságot okozhat a nem mágneseződő alapanyag bemérése []. A legnagyobb teljesítménnyel készült varrat ferrittartalma a koronarészen elérte az 5%-t, de a csiszolatokon mérve is majdnem 4% volt. Kalling'2 reagenssel való hosszú maratás után szembetűnik, hogy a varrat szélén egy keskeny zónában equiaxiálisak a szemcsék, majd a középvonal felé irányuló oszlopos szerkezet jellemzi a varratokat.



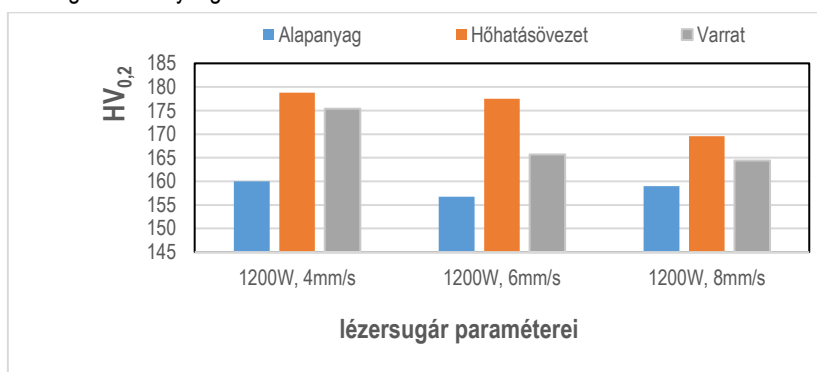
3. ábra A hegesztési paraméterek hatása a varratok ferrittartalmára.

3.3 Keménység változás

A hegesztési varratok vizsgálatánál előírás a 3-3 mérés az alapanyagban, a hőhatásövezetben és a varratban. Kis terhelést kell választani a keménységméréshez, hogy a lenyomatok a karakterisztikus zónában legyenek. Próbamérések alapján 1,98N-os terhelést választottunk. Az alapanyag keménysége az ausztenites szövetszerkezetnek megfelelően 160 HV alattinak adódott. Az alapanyagban mért keménység szórása 5HV_{0,2}-n belül volt.

Méréseink azt mutatták, hogy lézersugaras hegesztéskor a varratfém és a varrat hőhatásövezeete nagyobb keménységű lett, mint az alapanyag, ami a kialakuló δ -ferrit megjelenésével magyarázható. A varratok hőhatásövezetében mértük a legnagyobb keménységet, de megjegyzendő, hogy keménység a 200HV_{0,2}-t sehol nem haladta meg. Azonos hőbevitellel való hegesztés során a legkisebb sebességű hegesztés eredményezte a legnagyobb keménységet (4. ábra).

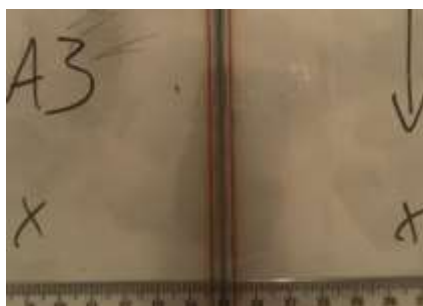
A mikrokeménység-mérési eredmények jó egyezést mutatnak a ferritszkópos mérésekkel, ugyanis a nagyobb ferrittartalmú mintáknál nagyobb az átlagos keménység.



4. ábra A hegesztési sebesség hatása a lézersugarason létrehozott varrat környezetének keménységére

3.4 Korróziós fogyas

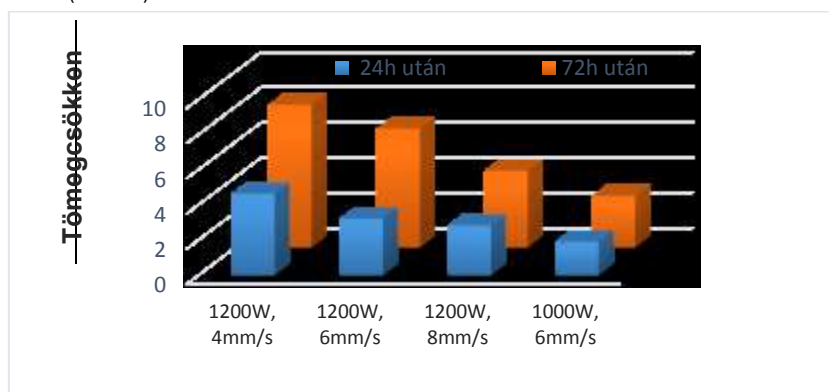
A szemrevételezés alapján feltűnt, hogy a védőgáz mennyisége nem volt teljesen megfelelő, mivel olyan oxidáció is bekövetkezett, mely nem szolgál védőréteggént. erre a varrat környezetének elszíneződése utal (5. a ábra). Korróziós vizsgálatokat 6%-os FeCl₃ vizes oldatban, teszteltük, az ASTM G 48/B szerint. Amennyiben nem pácoltuk a darabokat jelentős mértékű volt a lyukak mennyisége a 72 órás tesztelés után (5. b. ábra) főleg az irodalomból is jól ismert érzékeny övezetben



a) b)
5. ábra. Hegesztési varrat megjelenése
 a) hegesztés után b) 72 órás korróziós
 tesztelés után

A varratok környezetének lyukkorrózióval szembeni ellenállását 24 óra után vizsgálva, esetenként alig volt észlelhető a lyukkorrózió, de 72 óra után már

számos lyukat tapasztaltunk a varratok környezetében főleg szélesebb varratú mintáknál. Százalékosan figyelve a korróziós vizsgálatra kitett minták fogyását, megfigyelhető, hogy a korróziós fogyás az egységnyi varrathosszra bevitt energia csökkentésével csökkent (6. ábra).



6. ábra A hegesztési paraméterek hatása a varratok környezetének korróziós viselkedésére

4. Következtetések

LDL 30-3000 típusú dióda lézerforrás használatával 1,5 mm-es vastagságú lemezeket teljes átolvadással sikerült hegeszteni. A varrat védelmét argon gázzal biztosítottuk. Annak ellenére, hogy hozaganyagot nem használtunk a varrat ferrittartalma a koronarészen meghaladta a 3%-ot, a csiszolatoknál ez valamivel kevesebbnek adódott. Azonos lemezvastagságnál, azonos hegesztési teljesítmény alkalmazásakor, kimutatható, hogy a varratok ferritszrással mért ferrittartalma csökken a hegesztési sebesség növelésével. Mindegyik hegesztési sebességnél kimutatható, hogy a varratok keménysége az alapanyaghoz képest nő, de a hőhatásövezetekben mértük a legnagyobb keménységet, ami a deltaferrit mennyiségével hozható kapcsolatba.

A korróziós fogyás az egységnyi varrathosszra bevitt energia csökkentésével csökkent.

[Irodalomjegyzék](#)

[1] Kreisz István: Lézersugárforrások, Edutus Főiskola, 2012. 45-57 old

[2] Buza Gábor: Lézersugaras technológiák 1. Edutus Főiskola, 2012, 75 old

[3]. A. Alcocka , B. Baufeld: Diode laser welding of stainless steel 304L, Journal of Materials Processing Technology 240 (2017), 138–144

[4] Laser Focus World Lasers & Surces <https://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/laser-marking-how-to-choose-the-best-laser-for-your-marking-application.html> (Hozzáférés: 2020.02.24)

[5] Lyubomir Lazov, N Angelov: Physical model about laser impact on metals and alloys, Contemporary Materials II/ 2 (2010), 124-128;

[6] Direct Line Rozsdamentes acélok jellemzői katalógus http://www.dldh.hu/wp-content/uploads/2012/02/Direct_Line_rozsdamentes_acelok_jellemzoi_katalogus.pdf 19 old. (hozzáférés: 2020.12.05.)

A CSŐVÉGEK GEOMETRIAI ELTÉRÉSEINEK ÉS A KÖRVARRATOK ELKÉSZÍTHETŐSÉGÉNEK KAPCSOLATA TEREPI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT TÖRTÉNŐ HEGESZTÉSKOR

RELATIONSHIP BETWEEN THE GEOMETRIC DEVIATIONS OF PIPE ENDS AND THE PREPARATION OF GIRTH WELDS IN CASE OF FIELD-WORK WELDING

Kovács Judit

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-
Egyetemváros

metkjudit@uni-miskolc.hu

Lukács János

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-
Egyetemváros

janos.lukacs@uni-miskolc.hu

A csővezetékek kiváltása során mindenkor feladat a meglévő és az új, beépítésre kerülő csőszakaszok végeinek összehegesztése. Az illesztés a terepi körülmények között nem egyszerű feladat, amit nehezít az a gyakorlati probléma, amikor a meglévő csővég alakhibás (például ovális), ami a kiváltás minőségét is veszélyeztetheti. Ilyenkor a helyszínen, a csővég alakításával kell a szükséges és elégséges körköröséget biztosítani. Kutatómunkánk során áttekintjük azokat a terepen alkalmazható módszereket, amelyekkel a csővégekre vonatkozó geometriai követelmények biztosíthatók, és számba vesszük az egyes technológiák mechanikai tulajdonságokra és a körvarratok elkészíthetőségére gyakorolt hatásait.

When replacing pipelines, it is always a task to weld the end of old (operating for several years or even decades) and new pipe sections. The fitting is not an easy task during the field-work, and it hampered by a practical problem where the existing pipe end is defective (e.g. oval) thus it endangers the quality of the replacement. In this case, the necessary and sufficient circularity must be ensured on site by forming the pipe end. This research work summarizes the methods that can be applied during the field-work to ensure the geometric requirements for pipe ends was systematically presented, and the effects of each technology on the mechanical properties and the fabrication of girth welds was examined.

1. Bevezetés

Hazánkban a nagynyomású földgázszállító rendszer közel 6000 km hosszúságú, különböző átmérőjű (80 mm-1400 mm) acél csővezetékéből áll, mely jellemzően 63 barig (egyes esetekben 75 barig) terjedő nyomás alatt működik. A rendszer vezetékei közül 4000 km hosszúságot tesznek ki azok a csővezetékek, amelyek több mint 25 éve üzemelnek [1][2].

Működési élettartamuk alatt az olaj- és gázvezetékek gyakran geometriai torzulásokat (például horpadás, ovalítás, helyi felületi egyenetlenségek) halmoznak fel. A korrózió, a repedés, a horpadás, a bemetszés és az ilyen károsodások kombinációja a csővezetékek mechanikai károsodásának néhány gyakori példája. Az olaj- és gázvezetékek esetén a mechanikai károsodás az üzemelő csővezetékek meghibásodásának egyik fő oka, ami komoly veszélyt jelent a földalatti csővezetékek szerkezeti integritására. A véletlenszerű hatások által okozott incidensek nem ritkák a vezetékeken, az építkezéseken alkalmazott munkagépek véletlenül beleütközhetnek azokba, és mechanikai károsodásokat vagy repedéseket okozhatnak. A horpadás a cső keresztmetszetének durva torzulását okozza, amely helyi többlet feszültséget, ovalítást és a cső átmérőjének helyi csökkenését okozhatja. Repedés alakulhat ki horpadás, ütközés következtében, agresszív környezetnek való kitettség vagy a nyomásingadozásból és/vagy geotechnikai mozgásokból fakadó fáradás miatt is. A gyártás során az olaj- és gázvezetékek nagy átmérőjű csöveit szigorú ellenőrzések mellett készítik el, pontosan henger alakúra, de a későbbi szállítás és üzemeltetés során a csövek gyakran sérülnek, deformálódnak, ovalisak lesznek. Az ovalítás és egyéb sérülések hatására, amikor a terepen két csővég összehegesztésére kerül sor, a csővégek megfelelő illesztése nem lehetséges, így a későbbi esetleges kár termékkiesést, robbanást, tüzet, balesetet, valamint környezetszennyezést okozhat [3-5].

2. A csövek ovalításának terepi korrekciós módszerei

Terepen történő hegesztés esetén gyakran elengedhetetlen a csövek – különösen a nagy átmérőjű csövek – ovalításának helyszínen történő korrigálása. Amennyiben az illesztési nehézségeket megoldja, a hibás végeket célszerű levágni, kivéve, ha az 100 mm-nél nagyobb hosszvesztéssel jár. Egyes nagy átmérőjű csövek viszont olyan mértékben lehetnek deformálódva, hogy azokat újra kör alakúra kell formálni a kötés elkészítésének érdekében. Ez gyakori eset, és semmilyen módon nem befolyásolja a képlékeny alakváltozásra hajlamos csövek használhatóságát [6-8].

A korrigálás történhet hideg-, vagy melegalakítási eljárással is, viszont bizonyos esetekben a termomechanikusan kezelt, valamint a nemesített acélok szilárdsága tartósan csökken, mechanikai tulajdonságai pedig hátrányosan megváltoznak 580 °C fölé történő hevítés esetén. Ezért, a nagyobb deformációk melegalakítással való korrigálása nem javasolt. A hideg eljárásokat figyelembe véve, egyaránt léteznek belső és külső kerekítési (kör alakra formáló) módszerek, lehetőség szerint ezeket célszerű alkalmazni [6][9-11].

2.1 Belső kerekítési (kör alakra formáló) módszerek

A belső kerekítés egyik módszere emelő segítségével történik. Az ehhez szükséges felszerelések a következők [12]:

- legalább 10 tonna kapacitású hidraulikus „Port-A-Power” (manuális emelő segítségével ideiglenes kerekítés is végrehajtható),
- 2 fa tömb (kemény tölgy ajánlott),
- 2 acéllemez (legalább ¼” (6,35 mm) vastagságú és a fa tömb borítására alkalmas).

Ez az eljárás lehetővé teszi az ovális cső maradó kerekítését, így az eszköz eltávolítható a csőből az összeszerelés (illesztés) során. Javasolt az emelő és a cső között valamilyen betét használata a terhelés elosztására és a cső sérüléseinek az elkerülésére. A 4”x4” (101,6x101,6 mm) méretű, 6”-8” (152,4-203,2 mm) hosszú, a cső hossz tengelyéhez orientált faanyag kielégítő erre a célra. Az elrendezést a legkisebb átmérővel egy vonalban kell elhelyezni, kb. 4” (101,6 mm) távolságra a cső végétől. Az emelőre nyomást gyakorolnak a legkisebb átmérő növelése érdekében, amíg ez az átmérő kb. ½”-el (12,7 mm) nagyobb, mint a maximális átmérő. Az emelő nyomását lassan csökkentik és mérik a minimális és a maximális átmérőt. Ha az emelő nyomás lassú megszüntetése után a cső továbbra is ovális, az eljárást annyiszor kell megismételni, ahányszor szükséges, minden alkalommal a kisebb átmérőt ½”-el (12,7 mm) növelve. Miután a kerekítés sikeres az eszköz eltávolítható és az összehegesztés elvégezhető. Ha a cső hosszabb ideig „pihent” a kerekítési művelet és az összehegesztés között, akkor a körkörösséget a hegesztés előtt ellenőrizni kell [12][13].

Ezt a módszert egyszerűsége miatt gyakran alkalmazzák. Az egész művelet manuálisan elvégezhető beleértve az összes szükséges beállítást és az ékek rögzítését. Az eljárás hátránya lehet, hogy nagyobb átmérőjű, vastagabb csövek esetén a felhasznált hidraulika maximális kapacitása esetlegesen kevesebb, mint ami a cső ovalításának javításához szükséges. A megengedett üzemi nyomás túllépése esetén a tömítés meghibásodhat, valamint felléphetnek olyan veszélyek, mint az ékek megcsúszása [14].

Szintén belső kerekítésre alkalmas a *Manual Internal Line Up Clamp*. A kézi használatú eszköz felépítése a következő [15][16]:

- keret: támasztja a bilincset, négy alsó és egy felső keréken fut,
- vezetők: a bilincset a következő csőkötésbe irányítják,
- oldalkarok: három oldalkar gyűrű (két felső és egy alsó) igazítja a kapcsolódást,
- váltórudak: a két felső oldalkart a cső belső falához nyomják,
- retesz: két sárgaréz retesz rögzíti a bilincset a helyén, biztosítva az oldalkarok önbeállítását,
- kerek: lehetővé teszik, hogy a bilincs a következő csőkötésbe gördüljön.

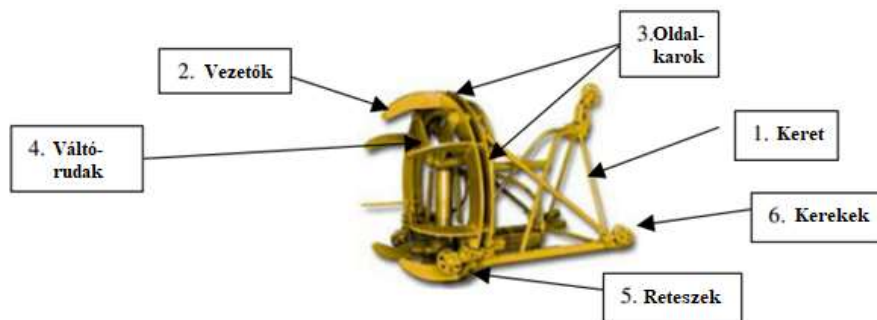
A *Manual Internal Line Up Clamp* segít a két cső illesztésében a hegesztés előkészítése során. Nagy teherbírású emelő (acélszerkezet), ami kisebb kezelői erőbefektetéssel biztosít nagyobb energiát. Nagy teherbírású acélszerkezetekhez is használható. Opcionálisan réz *back up* gyűrű, rozsdamentes acél, acél vagy szénacél borítás is elérhető hozzá. Lehetővé teszi a hegesztési hézag akadálytalan beállítását és a csövek megfelelő belső illesztését. A bilincs csőbe helyezése után (kb. 300 mm marad kívül) hozzáillesztik a másik csövet is, és csatlakoztatnak egy hosszabbító kart, ami szabványosan 49” (1244,6 mm), de bármilyen csőhossznak megfelelő rudakkal ellátható. A csatlakoztatott kar segítségével kiterjeszthető a bilincs mérete. Ellenőrzi a megfelelő illesztést, majd a hegesztés elvégzése után eltávolítják a csőből az eszközt [15-18].

Belső bilincs alkalmazásakor, ha a körülmények megnehezítik a cső elmozdulásának megakadályozását, vagy ha a varrat túlzottan megterhelődik, akkor a gyöksort be kell fejezni, mielőtt a szorítófeszültség felszabadul. Ha a gyöksor elkészítése előtt

megengedett a szorítóbilincs eltávolítása, akkor a gyöksor befejezett részének hozzávetőlegesen egyenlő szakaszokban kell elhelyezkednie, és körülbelül egyenlő távolságra a kötés kerülete mentén [19].

Minden csőközpontosítót a cső egyedi mérete (és falvastagsága) szerint alakítanak ki a pontos beállítás érdekében. 10"-60" (254-1524 mm) közötti méretben elérhető, de egyedi méret is igényelhető. A bilincs módosítására gyártás után is lehetőség van, de gyártói javaslat szerint ± 4 mm belső falvastagság változásig nincs szükség változtatásokra [17][18].

A *Hydraulic Internal Line Up Clamp* alapfelépítése a *Manual Internal Line Up Clamp*-el megegyezik, viszont erős hidraulikus emelővel van ellátva (1. ábra). A kézi változat összes előnye érvényesül a használatkor, kezelése egyszerű és nincs szükség külső áramforrásra. Alapkvitelben 18"-64" (457,2-1625,6 mm) közötti különböző mérettartományokban érhető el [17][20].



1. ábra.

Hydraulic Internal Line Up Clamp [15].

A belső kerekítés egy másik módszere a 2. ábrán látható, különböző kivitelekben és felszereltségben kapható *Internal Pneumatic Line Up Clamp* (IPLC).



2. ábra.

Internal Pneumatic Line Up Clamp [21].

Az eszköz a cső belsejében működik, a csövek illesztése is megoldható a segítségével a külső hegesztéshez. Az IPLC-k rendkívül robusztus és magas műszaki színvonalon megépített berendezések, annak érdekében, hogy megfeleljenek a szükséges műveleteknek és elvárásoknak. Bármilyen falvastagsághoz vagy mérethez beállíthatók a megadott tartományon belül, mivel a függetlenül működtethető pneumatikus fejek lehetővé teszik az alkalmazást különböző falvastagságú csövek esetén is. Megfelelő használat mellett nem károsítják a csöveket. A kötésekhez manuálisan mozgathatók; működésükhöz sűrített levegő szükséges, amihez tartalék tankkal is el vannak látva. A kézzel mozgatható modellek 6"-18" (152,4-457,2 mm) között (különböző mérettartományokban) alkalmazhatók [21].

Az IPLC-khez hasonló berendezések léteznek úgynevezett önjáró kivitelben is. Ezek is belső csőközpontosítók, amelyeket kifejezetten nagy átmérőjű csövek építéséhez fejlesztettek ki. Az eszköz hidraulikus ereje igazítja a nagyszilárdságú acélcsöveket a tökéletes beállítás elérése érdekében, ami elengedhetetlen a mai automatikus hegesztő berendezések alkalmazása esetén. Minden funkció pontosan vezérelhető, vezeték nélküli távvezérlő segítségével, beleértve a hegesztési rés beállítását is. Általában 10" (254 mm) és 60" (1524 mm) közötti, különböző mérettartományokban érhető el [22].

2.2 Külső kerekítési (kör alakra formáló) módszerek

A külső kerekítéshez alkalmazható egyik módszer az *External Rounding Kit* segítségével történik (amely egy emelőből és egy láncból áll). Ovalítás esetén, amennyiben megoldható, a cső legnagyobb átmérőjét függőleges helyzetbe kell állítani az emelő könnyebb elhelyezéséhez. A cél a cső legnagyobb és legkisebb átmérőjének az alakítása, úgy, hogy azok újra egyenlő méretűek legyenek. Az emelő elhelyezése a cső legnagyobb átmérőjére történik, majd a lánc enyhe feszítése következik a cső körül. Az emelőt a helyén kell hagyni az összeszerelés/hegesztés elvégzéséig. Az alkalmazás során a kerekítést a legjobb az emelő mögött elvégezni. A kötés elkészítése után az eszköz eltávolítása kerülhet. A felhasználás során a túl nagy erő veszélyezteti az eszközök épségét, ezért nagyobb átmérőjű és vastagabb csöveket nem javasolt *External Rounding Kit* segítségével kerekíteni [13][23].

A külső kerekítési módszerek alkalmazásakor gyakran használnak különböző csőrogzítók és központosítókat a feladat elvégzésére. A 3. ábrán látható *PF Clamp* egyedi kialakítása rendkívül erős szorítást biztosít, amely minden csőtípus esetén alkalmazható (akár szénacélból vagy rozsdamentes acélból készült cső esetében is). A bilincs összes csővel érintkező pontja rozsdamentes acélból készül, a csavarok pedig horganyzott acél gömbfejjel vannak ellátva, a tökéletes illeszkedés érdekében [24].

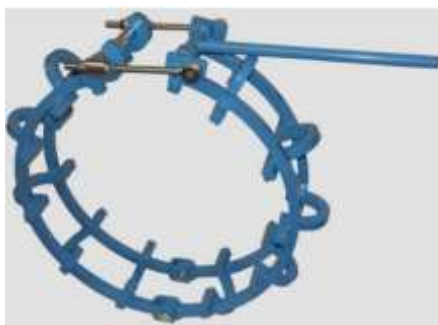


3. ábra.

PF Clamp [24].

A *PF Clamp*-hez hasonló a *WT Clamp* és az *SC Clamp* is. A *WT Clamp* esetén a karok öntött alumíniumból készülnek, az *SC Clamp* pedig kovácsolt acélból készül. 1"-14" (25,4-355,6 mm) közötti különböző mérettartományokban elérhető. Cső-cső, valamint cső-szerelvény kapcsolatok hegesztése is könnyen kivitelezhető a segítségükkel. Alkalmazhatók rozsdamentes acél, duplex és egyéb ötvöztött acél típusokhoz is [24].

A külső, mechanikus működtetésű csőrogzítók és központosítók másik típusai az ECM sorozatú külső illesztésű, mechanikus működtetésű csőrogzító- és központosító készülékek (4. ábra). Ezek különböző tartományokban lévő, 4"-48" (101,6-1219,2 mm) közötti külső átmérőjű csövek hegesztéséhez történő gyors és pontos illesztéséhez használhatók. Egyaránt alkalmasak csövek, illetve cső-csőív, cső-T-idom, cső-karima egymáshoz való illesztéséhez. A masszív szorítópfák és a mechanikus működtetésű feszítőszerkezet együtt biztosítja a csövek és/vagy különböző csőidomok éleltolódás nélküli illesztését. A masszív beállítócsavaroknak köszönhetően normál falvastagságú csövek esetében a készülék alkalmas a cső deformációjának kiküszöbölésére is. A készülék kialakítása jó hozzáférést biztosít a varratgyök elkészítéséhez a cső kerületének nagy részén, így a hegesztés alatt akár végig alkalmazható. Ha a hegesztés közben el kell távolítani az eszközt, akkor a gyöksor szegmenseit egyenesen kell elhelyezni a cső kerülete mentén, továbbá, az összesített hosszuknak el kell érniük a cső kerületének minimum az 50%-át. Az eszköz kis tömegének köszönhetően eredményesen használható helyszíni szereléseken is [19][25].



4. ábra.

ECM sorozatú külső mechanikus csőrögzítő és központosító [25].

Az ECM sorozatú, külső illesztésű, mechanikus működtetésű csőrögzítő és központosító készülékekhez hasonlóak a HD típusú, külső illesztésű, hidraulikus munkahengerrel működtetett csőrögzítők és központosítók, amelyek a csövek hegesztéshez történő gyors és pontos illesztéséhez használhatók. Egyaránt alkalmasak csövek egymáshoz, illetve cső-csőív, cső-T-idom és cső-karima egymáshoz való illesztéséhez. A masszív szorítópofák és a kézi pumpával működtetett hidraulikus munkahenger együtt biztosítja a csövek és/vagy a különböző csőidomok éleltolódás nélküli illesztését. Hasonló elven működő pneumatikus csőrögzítők és központosítók is elérhetők. 40" (1016 mm) felett a rögzítők két pneumatikus motorral vannak felszerelve, annak érdekében, hogy biztosítsák a megfelelő elmozdulási sebességet és elegendő teljesítményt a 20° feletti dőlésszögben történő működéshez is [25][26].

Nagy szakítószilárdságú csövek (például X65, X70, X80) alakításához, amelyek falvastagsága maximum 1 3/8" (35 mm), alkalmazható a *Mega Rim Clamp* (5. ábra) [27].



5. ábra.

Mega Rim Clamp [27].

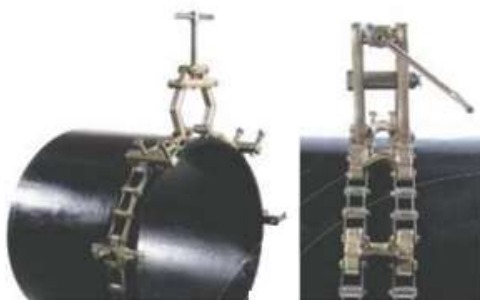
Az eszköz képes a cső formázására ovális állapotban, legfeljebb 2"-ig (50,8 mm). A bilincs nagy teherbírású, ovális alakú oldallemezekből, reteszelő mechanizmusból és a csövek és a szerelvények egyesítéséhez felhajtható szorítókból áll. A csuklós felhajtható szorítókat pontosan pozícionálják a bilincsen és elfordíthatók az elsődleges csőtől a párosítandó cső, szelep vagy szerelvény behelyezéséhez, megkönnyítve ezzel a hegesztést és a kőszörülést. Az emelőcsavarok független elfordítható betétei ellensúlyozzák az egyenetlen csőfelületeket. A szennyeződések elkerülése érdekében a bilincs összes csővel érintkező felülete rozsdamentes acélból készül [27].

Hasonló kialakítású a *Super Clamp* is, amelynek segítségével a cső beállításán és alakításán kívül a hegesztési rés beállítására is van lehetőség [28].

A külső csőrögztítő készülékek egy másik típusa, a láncos csőrögztítők, amelyek rendkívül sokoldalúak. Valamennyi szorító masszívan rögzíti a csőíveket, T-idomokat, karimákat és más csőidomokat. Az erős szorítók biztosítják a csövek egymáshoz, vagy más csőidomokhoz történő központosítását és éleltolódás nélküli illesztését. Normál falvastagságú csövek esetében a készülékek alkalmasak a cső deformációjának kiküszöbölésére is. A láncos csőrögztítők különféle nagyságban és különféle kialakításban (egysoros és kétsoros) készülnek (6. ábra) [25].

Ezek a csőrögztítők beállítják és egymáshoz képest igazítják a csöveket, 1/2" (12,7 mm) falvastagságig, 2500 kg szorítóerővel. Többféle csőmérethez használhatók és az emelőkarok segítségével az eltávolításuk egyszerű. Minden csőrögztítő 5" (127 mm) mérettől használható és akár rozsdamentes acélhoz is alkalmazható. Széles tartományban módosítható a méretük a láncszemek és a szorítók számának módosításával [24].

Vannak nagy teljesítményű láncos csőrögztítők (például S300, D300 és DK300 típusú), amelyek képesek a csöveket 20 mm falvastagságig beállítani, igazítani. Könnyen használhatók és garantálják a csövek tökéletes rögzítését [24].



6. ábra

Egysoros és kétsoros csőrögztítők [24]

A kétláncos csőrögztítők (*HD Clamp*) szintén elérhetők hidraulikus kivitelben is. Egy könnyen kezelhető rendszer segítségével cső-cső, cső-csőív, cső-karima kapcsolatok hegesztéshez történő beállítására és igazítására alkalmasak. A *HD Clamp* hidraulikus láncos csőrögztítő 6" (152,4 mm) és 60" (1524 mm) átmérőjű csöveken is használható, mivel a szorítók állíthatók és kivehetők; a *HP Clamp* pedig 1" (25,4 mm) falvastagságú csövek beállítására és igazítására is alkalmas. Az eszköz minden csővel érintkező része rozsdamentes acélból készül, a nukleáris, a tengeri és a petrokémiai ipar követelményeinek teljesítése érdekében, elkerülve ezzel a cső sérülését és szennyeződését [24].

3. Összefoglalás

- 1) A csövek ovalításának korrigálása történhet hideg-, vagy melegalakítással. Tekintettel arra, hogy egyes anyagminőségeknél a melegalakítás következményeként mechanikai tulajdonságromlás léphet fel, ezért a hidegalakítási módszerek valamelyikének használata javasolt. Elvileg egy melegalakítási technológia megvalósításához szükséges hőhatás is kézben tartható, annak lokális alkalmazása – különösen terepi viszonyok és más kényszerek fennállása esetén – azonban magas(abb) kockázatúnak minősíthető. A hidegalakítás mértéke nem lehet olyan, hogy – az azt követő hőhatással együtt – a hegesztett kötés tulajdonságai (például szemcsedurulás okán) kedvezőtlenül alakuljanak.
- 2) A csövek ovalításának helyszínen történő korrigálására számos megoldást fejlesztettek ki. Egyaránt léteznek belső és külső kerekítési (kör alakra formáló) módszerek, amelyek mechanikus, hidraulikus vagy esetenként pneumatikus kivitelben is elérhetők.
- 3) A szakirodalomban szereplő információk alapján, a korlátok között elvégzett és kézben tartott hidegalakítás számottevően nem befolyásolja a csövek mechanikai tulajdonságait.
- 4) A belső kerekítési (kör alakra formáló) módszerek egyik előnye, hogy azok megvalósítása nem befolyásolja a hozzáférhetőséget a hegesztés során, viszont – mivel a legtöbb belső eljárás a csővégek illesztésre is alkalmas – megegyező külső átmérőjű, de különböző falvastagságú csövek esetén alkalmazásuk korlátozott lehet.
- 5) Az egyes eljárások közül érdemes a mechanikus eszközök helyett a hidraulikus eszközöket választani, mert azok alkalmazásával nagyobb energia fejthető ki, ezáltal könnyebben és szélesebb tartományban végezhető el a felületi deformáció.

Irodalomjegyzék

- [1] <https://fgsz.hu/vallalatunk/tevekenyseguink-uzletpolitika/a-foldgazszallitasrol/tavvezetek.html>
- [2] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: A Magyar Földgázrendszer 2017. évi adatai, Patria Nyomda Zrt., Budapest, 2018.
- [3] Kawaljitsingh Randhawa: Ovality in Pipes, International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science, 3rd Special Issue on Engineering and Technology, Vol. VI, Issue VII, 2017.
- [4] Sergio B. Cunha, Bianca C. Pinheiro, Ilison P. Pasqualino: High Cycle Fatigue of Pipelines With Plain Dents: Simulations, Experiments and Assessment, 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Conference Paper, San Diego, USA, 2007.
- [5] Hossein Ghaednia, Sreekanta Das, Rick Wang, Richard Kania: Effect of dent depth on the burst pressure of NPS30 X70 pipes with dent-crack defect, Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference, Conference Paper, Calgary, Canada, 2014.
- [6] Keszthelyi Ferenc: Csővezetékek hegesztése, 2. átdolgozott és bővített kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [7] <https://www.dipra.org/ductile-iron-pipe-resources/frequently-askedquestions/installation>
- [8] AMERICAN Pipe Joints, Section 2. Online version of AMERICAN Pipe Manual 19th Edition (<https://american-usa.com/>)
- [9] MSZ EN 10208-1:2009 Acélcsövek éghető cseppfolyós anyagok csővezetékeihez. Műszaki szállítási feltételek. 1. rész: A osztályú csövek.
- [10] MSZ EN 10208-2:2009 Acélcsövek éghető cseppfolyós anyagok csővezetékeihez. Műszaki szállítási feltételek. 2. rész: B osztályú csövek.
- [11] MSZ EN 12732:2013+A1:2014 Gázinfrastruktúra. Acélcsövek hegesztése. Működési követelmények.
- [12] U. S. Pipe, Rounding methods, Out-of-round 12" and larger diameter ductile iron pipe, 2007 Edition.
- [13] <https://www.mcwaneductile.com/blog/how-to-round-ductile-iron-pipe-by-jackinginternally/>
- [14] M. Balachandran: Ovality Correction Methods for Pipes, International Journal on Mechanical Engineering and Robotics, Vol. 3, Issue 1, pp. 2321-5747, 2015.
- [15] <https://proline-global.com/products/>
- [16] <https://www.ssegpl.com/manual-internal-lineup-clamp.html>
- [17] <https://pces.uk.com/products/pipeline/pipe-clamps/internal-manual-and-hydraulic-lineup-clamps/>
- [18] <https://tremcopipeline.com.au/construction-equipment/sawyer-manufacturingcompany/internal-clamps/large-manual-clamp/>
- [19] API Standard 1104 21st Edition, Welding of Pipelines and Related Facilities, 2013.
- [20] <https://dyna-torque.com/hydraulic-internal-line-up-clamps/>
- [21] <https://www.crc-evans.com/onshore/technology/clamps/internal-pneumatic-line-clamps-iplcs>
- [22] <https://www.hercules-pipeline.com/red-ram-clamp/>

- [23] <https://www.mcwaneductile.com/blog/how-to-use-mcwane-ductile-s-field-rounding-kit/>
- [24] <https://www.weld-tech.com/en/c/clamps/>
- [25] POLYWELD Kft. Termékismertető.
- [26] http://europipeline-equipment.com/sito/flv_portfolio/line-up-clamps/
- [27] <https://www.mathey.com/Pages/clamp-mega-rim.htm>
- [28] <https://www.mathey.com/Pages/clamp-super-clamp.htm>

NUKLEÁRIS KUTATÓREAKTOROKHOZ GYÁRTOTT BERENDEZÉSEK MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSA, HEGESZTÉSE, ANYAGVIZSGÁLATA

QUALITY ASSURANCE, WELDING, MATERIAL TESTING OF EQUIPMENT MANUFACTURED FOR NUCLEAR RESEARCH REACTORS

Dr. Grósz Tamás

HNF Technologies Kft

1106 Budapest, Fehér út 10.

grt@hnftec.hu

Dr. Ladányi Péter

Interproject Europe Kft

2000 Szentendre, Stéger köz 8

Interproject.eu@gmail.com

Ismertetjük a kutatóreaktorba beépített nagy megbízhatóságú hidegneutron forrás létesítésének követelményeit. Az aktív zóna közelében extrém körülmények között működő cseppfolyós hidrogén moderátor legalább tíz éves élettartama során nem javítható. A meghibásodás elkerülése érdekében szigorúan ellenőrzött gyártástechnológia szükséges, különös tekintettel az alumínium alkatrészekből hegesztéssel összeállított bonyolult vékonyfalú részegységekre, valamint az ausztenites acél hőcserélőre és csőrendszerre

The requirements for the implementation of a high-reliability cold neutron source installed in the research reactor are described. The liquid hydrogen moderator operating in extreme conditions near the active zone cannot be repaired during at least ten years of service life. To avoid failure, strictly controlled manufacturing technology is required, especially for complex thin-walled components welded from aluminium parts as well as for the austenitic steel heat exchanger and piping system.

1. Bevezetés

A 2000-ben alapított HNF Technologies Kft. szakemberei – korábbi együttműködésüket tekintve –30 év tapasztalattal rendelkeznek a legszigorúbb követelményeknek megfelelő, kutatóreaktorokban alkalmazott segédberendezések elsősorban cseppfolyós hidrogén (LH₂) vagy deutérium (LD₂) hidegneutron források tervezése és gyártása terén. Berendezéseink kulcsrakészen, a megrendelő igényeinek és a nukleáris kutatóreaktor paramétereinek megfelelően kerülnek telepítésre.

Befejezett projektjeink:

- | | | |
|--------|-----------------------------------|--|
| • 2000 | KFKI reaktor, Budapest | LH ₂ hidegforrás |
| • 2006 | ANSTO Opal RR, Sydney, Ausztrália | LD ₂ hidegforrás |
| • 2010 | INPC CMRR, Mian Yang, Kína | LH ₂ hidegforrás |
| • 2017 | CIAE CARR, Beijing, Kína | LD ₂ hidegforrás |
| • 2018 | ANSTO OPAL, Sydney, Ausztrália | LD ₂ hidegforrás – új termoszfion |

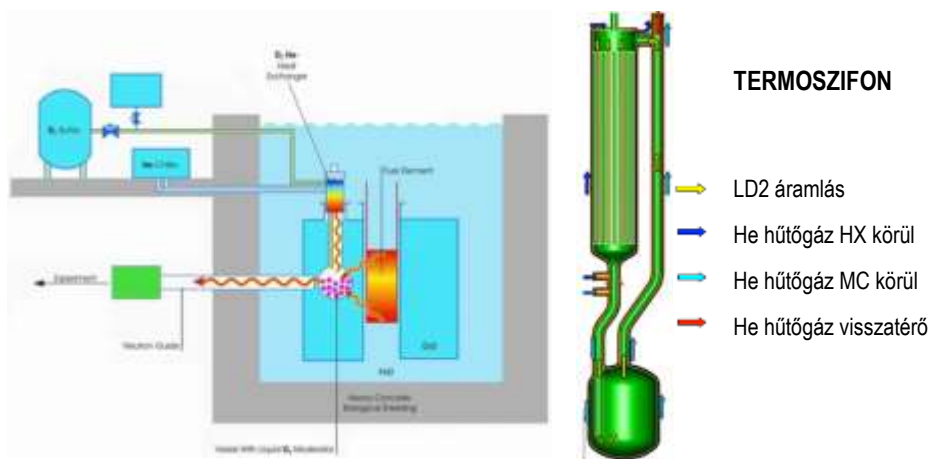
Jelenleg folyamatban van az ausztrál OPAL reaktornál működő hidegforrás központi egységének (termoszifon) a tervezési élettartam lejártá utánra ütemezett cseréjénél a külső ellátó alrendszerek (hélium, deutérium, vákuum, nehéz víz) csatlakoztatásához szükséges kiegészítő csőrendszerek gyártása.

2. A hidegneutron forrás működése

A kutatóreaktorokban a nagy energiájú hasadási neutronok lassításával keletkező termikus neutronok kivezetett nyalábjait használják széleskörű tudományos és alkalmazott anyagszerkezeti kutatásokra. A kutatási lehetőségek jelentős kiterjesztéséhez (jobb felbontás, nagyobb érzékenység) szükségesek a kisebb energiájú, nagyobb hullámhosszú, ún. hidegneutronok. Ezek előállítására egy hűtött tartályt, a az aktív zóna közelében elhelyezkedő moderátor kamra szolgál

megtöltve alacsony hőmérsékletű neutron lassító közeggel (cseppfolyós hidrogén vagy deutérium), amelyben a termikus neutronok az atommagokkal ütközve energiájukat leadják és hidegneutronokká alakulnak.

A tervezés során neutronos számításokkal határozzuk meg moderátor kamra optimális helyét és alakját. A cseppfolyós hidrogén hűtését a hőcserélőben és a kettős falú kamra körül áramló hideg hélium gáz biztosítja egyfázisú termoszfion hurokban. A hűtőkör méretezését termohidraulikai számítások biztosítják. A szükséges falvastagságokat szilárdsági számításokkal, a tervezési élettartamot kockázatelemzéssel határozzuk meg.



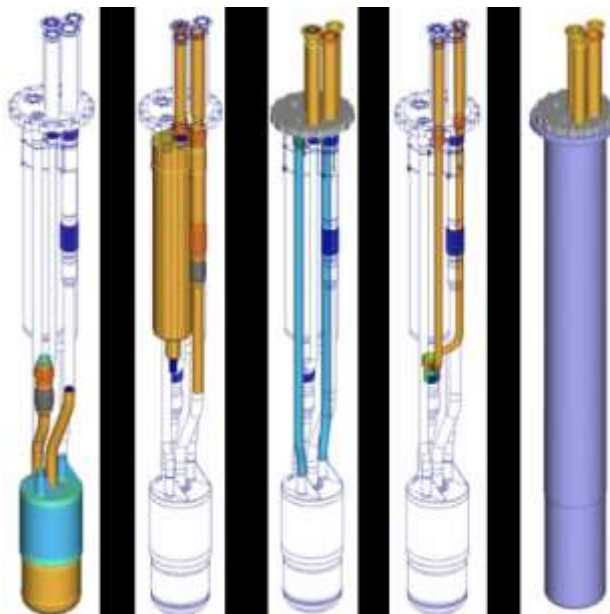
1. ábra

A hidegneutron forrás sematikus elrendezése és a termoszfion működése

Termoszifon

Komponensek:

1. Moderátor Kamra & Neutron Reflektor
2. Hőcserélő
3. Felső Karima & Nehéz víz csövek
4. He Bevezetés
5. Robbanásbiztos vákuum tartály



1

2

3

4

5

2. ábra

A termoszfion felépítése

A hidegforrás extrém körülmények között működő nagy megbízhatóságú komplex rendszer:

- Alacsony hőmérséklet 20 K (-250 C) ciklikusan
- Intenzív ionizáló sugárzás (neutron, gamma)
- Hosszú élettartam 10-15 év
- Termoszifon nem javítható, meghibásodása a reaktor hosszú idejű nem tervezett leállítását okozza
- Nukleáris-Hidrogén biztonság prioritása, a reaktor „worst case scenario” esetén sem sérülhet – a termoszifon robbanásbiztos vákuumtartályban helyezkedik el

Tipikus adatok/követelmények

- Neutron lassító közeg – LH₂ / LD₂
- Moderátor cella térfogat – 0,5-2 l / LH₂ moderátor közeg
– 10-30 l / LD₂ moderátor közeg
- Hőterhelés 20 K-nél – 0,25–8 kW
- He hűtőgáz áramlás – 10-100 g/s
- Kettősfalú moderátor kamra – Al ötvözet
- Nyomásállóság – 6 bara
- He Gáztömörség – 10⁻⁸ mbar l/s
- Méretpontosság – He gázáram
- Kamra tömeg minimalizálás – hőterhelés csökkentése
- Élettartam korlátozó tényezők – sugárkárosodás
– elemátalakulás (Al-Si transzmutáció)

3. A berendezés gyártása, minőségbiztosítása és hegesztése

3.1 Követelményrendszer

A kutató reaktorok nem esnek a BPV Code Section XI (ASME) kötet és 2014/68/EU (PED) hatálya alá sem. Ugyanakkor ASME III/IX és XI. fejezeteit az Orosz Nukleáris Szabályzatot a német AD Merkblatt-ot valamint a PED előírásainak egyes pontjait értelemszerűen alkalmazni lehetett. A megrendelő az *OPAL Reactor CNS MK2 IN-Pile Assembly megrendelői QM specifikációját* írta elő. Ez kiegészült a HNF gyártói QM specifikációjával.

Végül az alábbi előírásokat és szakmai anyagokat alkalmaztuk:

- ASME előírások (pl. B 807-02), PAEN G-07-008-89 sorozat, AD-Merkblatt 8/1, EN ISO 13445-4, EN ISO13480-4 stb.
- MSZ EN ISO 3834 -2 szerinti üzemalkalmassági tanúsítás, MSZ EN ISO 15614-2 eljárásvizsgálatok tanúsítása, MSZ EN ISO 9606-2 :2017 hegesztő tanúsítás
- Készült egy *magas színvonalú élettartam meghatározás* a teljes berendezésre (15 év garantált üzemelés, neutron degradáció és hősokk, stb figyelembevétel), *Tervezési, gyártási FMEA tanulmány és részletes hegesztési feszültség analízis* (ANSTO ausztrál reaktorosok közreműködésével).

Az ausztrál ANSTO cég elfogadta a TÜV Rheinland InterCertet mint nemzetközi elismeréssel rendelkező tanúsítót intézetet nem ragaszkodott az ASME szerinti gyártóüzemi tanúsításhoz, és a PED –et mint nyomástartó berendezések gyártáshoz irányadó direktívát

3.2 A projekt tartalma, a hegesztés feltételeinek biztosítása

A project az alábbi fő egységek legyártását (3-3 db minden tételből) tartalmazta:

Belső displacer kamra	alumínium ötvözet
Moderátor cella (s=1,6 mm)	alumínium ötvözet
Moderátor és Reflektor kamrák	alumínium ötvözet

D₂ és He csővezeték rendszer
a kamrák és a Hőcserélő között alumínium ötvözet / ausztenites acél

Hőcserélő ausztenites acél

A termoszfion működését kiszolgáló külső ellátó alrendszerekhez (hélium, deutérium, vákuum, nehéz víz) csatlakozást biztosító egyszeres illetve duplafalú ausztenites acél vezetérendszer.

A HNF cég korábban nem foglalkozott saját gyártással. Magyarországon nincsen kutató reaktor berendezéseit létrehozó cég, sőt a világon is csak néhány van belőlük, így először is ki kellett alakítani a feltételeket: daruzott műhelyt bérelni, hegesztő és vizsgáló részt kialakítani, belső és külső raktár megszervezni bejövő áru ellenőrzését, anyagvizsgáló részleget szervezni. A hegesztéshez Migatron Navigator 3000AC/DC hegesztő áramforrás a vizsgálatokhoz héliumos lyukkereső, Oerlikon Leybold Phoenix 300i és komplett fémmegmunkáló szerszámpark került beszerzésre

Miután a HNF QM rendszere az adott projektre összeállt és kellő ideig működött a hegesztés feltételeit kellett megteremteni. Végeredményben 12 hegesztési eljárás WPQR, 10 hegesztő tanúsítás lett kiállítva és 24 WPS került kidolgozásra.

A tényleges hegesztési munkát csak akkor lehetett elkezdni miután a megrendelő ellenőrizte a teljes hegesztési tanúsítási dokumentációt

3.3 Alkalmazott alap- és hozaganyagok

A beszerzésre kerül alapanyag lemez, cső, rúd és kovácsolt darabok formában történt.

Anyag megevezése	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Egyéb
Al-5456	<0,25	<0,40	<0,10	0,5-1,0	4,7-5,5	0,05	<0,25	<0,15	<0,15
AlMg5 GOST 4784-97	0,50	0,50	0,10	0,5-0,8	4,8-5,8	-	-	-	-
AlMg5 HNF mérés ¹	0,16- 0,18	0,32	0,10	0,45	5,0	-	0,08	0,04	0,10
Sv-AlMg63	0,05	0,05	0,05	0,8-1,1	5,8-6,8	-	0,05	-	0,01
AlMg5	<0,01	0,11	<0,11	0,14	4,8	0,11	<0,01	0,09	-

1.táblázat

Alumínium ötvözetű alap-és hozaganyagok

- 1) Minden tétel alap- és hozaganyagot a HNF saját maga is bevizsgáltatta. Ezután az anyagok a MRIP (Material Reception and Inspection Plan) listába kerültek megrendelői jóváhagyásra

Anyag megnevezése	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	P	S
304L	0,017	0,505	1,823	18,220	8,065	-	0,082	0,030	0,001
316L	0,019	0,400	1,060	16,660	10,080	2,010	0,048	0,029	0,001
LER308L	0,020	0,500	1,700	1,700	12,300	-	-	-	-

2.táblázat

Ausztenites cső alapanyagok és hozaganyaguk

3.4 Hegesztés

A termoszfion hegesztés legfőbb nehézségei a következők voltak.

A moderátor kamra egy összetett alumínium csőszerkezet, ami több egymásba helyezett vékonyfalú alumínium héjszerkezetbe épül bele. Az alumínium tartályok falvastagsága 1,5mm és a köztük levő rádiusz különbség is pont ennyi. A két tartály közötti távolságot cirkónium tűskékkel biztosítottuk. A szerkezetnek igen szoros tűrése volt, tehát a hegesztési hőtől nem húzódhat el.

Az alumínium héjszerkezetek gyakorlatilag nem javíthatók, így teljesen „hibamentes” varratokat kellett készíteni. Ez az alumínium esetében nem volt egyszerű.

A csővezetékek bonyolult térbeli kialakítással, döntően duplafalúak. Így a belső varratok elkészítését bonyolult és szigorú szerelési technológiát igényeltek. A függőlegestől mért cső tengely eltérés max 2mm/3m. Pontos egytengelyűség volt a feltétel, valamint igen szigorú tisztaság, polírozott felület biztosítása (mind az alumínium, mind az acél esetében) valamint meghatározott terméktömeg betartása (15,51 kg),

A bonyolult és egyedi termékek miatt mechanizált, automatizált eljárások nem jöhettek szóba így 141, (TIG) kézi volfrám elektródás védőgázos ívhegesztést választottuk, PA illetve PG pozícióban forgatva, gyök- támasszal (ahol lehetett) A varratok a vékony falak miatt egysoros kialakításúak voltak. A hegesztő pálca átmérője 1,0, 1,2 2,0 és 2,4 mm volt.

Az eljárásvizsgálatok keretében jól begyakorolt technológia és technika ellenére az alumínium varratok kezdetben gázosodtak. Az alumínium csövek összehegesztésével nem volt gond, de ha cső és megmunkált például tömbből esztergált alumínium darabot kellett meghegeszteni, előfordult a varratmenti gázosodás, feltehetően megmunkálási okozta mikro szennyeződés miatt. Mivel a héjak varratainak teljesen hibamenteseknek kellett lenniük, a készre hegesztett varratot hozaganyag nélkül újra átolvasztottuk és ezzel a gázok kiáramlását elősegítve sorozatosan jó, hibátlan varratokat kaptunk. Minden tartály és cső körvarrat röntgenezve lett.



3.ábra

A termosifon alumínium ötvözetű tartálya a reflektor kamrával az összeállító asztalon

Minden egyes munkadarabot komoly tisztítási folyamatnak vetettük alá, a hozaganyagot is egyenként lecsiszoltuk és összeállítás után minden hegesztendő élt acetonnal vagy ipari alkohollal áttörülgettük. Munkavégzés kizárólag fehér kesztyűben és fehér köpenyben történhetett.

Az összehegesztett kész berendezés hőkezelési paraméterei: felhevítési sebesség 150°C/óra, hőtartás kb. 350°C-on 30 perc, hűtés levegőn. A hőkezelés részleges eredmény adott, később elhagytuk.



4. ábra

A reflektor kamra és a hőcserélő összehegesztése duplafalú alumínium / ausztenites csövekkel az összeállító segédberendezésben

Az ausztenites vékonyfalú ($s=1,0\text{mm}$ -től felfelé) csöveknél nem merült fel hegesztéssel összefüggő probléma.

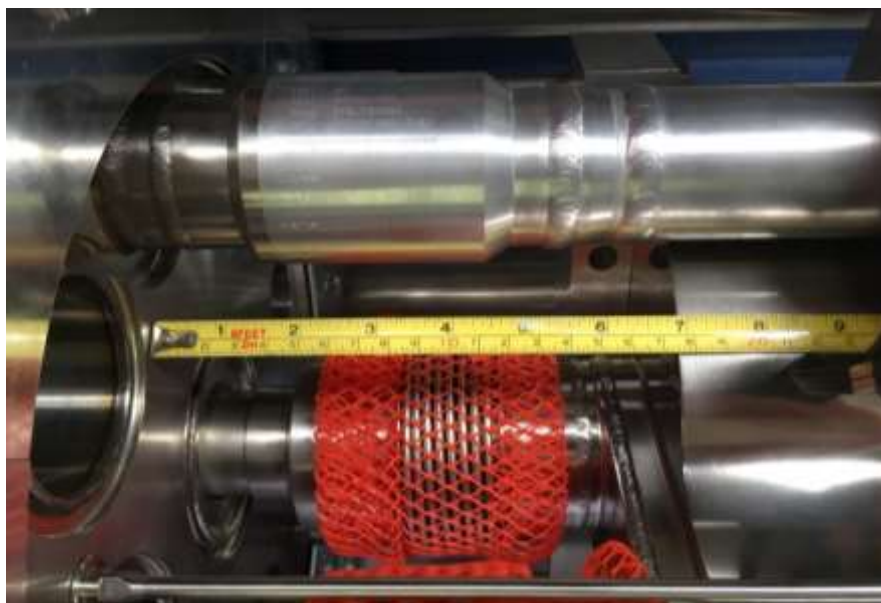
A munka elkezdése előtt egy átfogó zsugorodási vizsgálat sorozat készült az összes jellemző méretű és falvastagságú acélcső bevonásával a szoros hosszméretek egzakt kézbentartásához. A vizsgálatok lefolytatásának leírását mellőzve az alábbi értékeket kaptuk:

Cső átmérő és falvastagság /mm/	Zsugorodás mértéke /mm/	Megjegyzés
21,3 x 2,1	0,33 ¹ 0,57	Minimális hőbevitellel, maximális hőbevitellel és 0,5mm gyökhézaggal
88,9 x 3,0	1,09 ²	Az előírt hőbevitellel,
108 x 3,0	1,06 ² 1,30	Minimális hőbevitellel maximális hőbevitellel és 0,5mm gyökhézaggal

3. táblázat.

A ausztenites csővarratok zsugorodási kísérleteinek eredménye

1) 6-6 vizsgálat átlaga, 2) 4-4 vizsgálat átlaga



5.ábra

Az ausztenites és alumínium ötvözetű csövek összehegesztése bimetal paszdarabbal valamint egy radiális kompenzátor beszerelése

A legyártásra kerülő ausztenites acélcső rendszerek egymástó kissé eltérő acélfajtákból lettek betervezve és beépítve az az A304L és A316L típusokból (az eltérés elsősorban a Mo, Ni és Cr tartalomban és a szakítószilárdság értékében van) amihez a hozaganyag gyártók különböző típusú hozaganyagot ajánlottak. Ezért átfogó eljárásvizsgálatot csináltunk a TÜV által végzett mechanikai és metallográfiai vizsgálatokkal alátámasztva. A kísérletet és értékelését mellőzve az eredmények alapján az AWS ER 308L hozaganyag alkalmazása mellett döntöttünk.

4. Anyagvizsgálat

4.1 Az ipari gyakorlatban szokványos és nem szokványos anyagvizsgálatok

Az igen alapos és elfogadott Inspection and Testing Plan (ITP) alapján minden egyes darab átesett az alábbi vizsgálatokon:

Nr	Vizsgálatok megnevezése	Szabvány száma	Elfogadási kritérium	Megjegyzések
1	Vizuális vizsgálat	EN ISO 10042 (Al) ENISO 5817(Acél)	Level B Level B	Jellemzően indikáció mentes
2	Radiográfia	EN 12517-2 (Al) EN12517-1 (Acél)	Level 1 Level 1	Kezdetben némi gázosodás,
3	Festékbetolós vizsgálat	EN ISO 23277	Level 1	Indikáció mentes
4	Nyomáspróba	HNF házi előírások szerint	Tömörség 6 báron	Megfelelő

4. táblázat.

Szokványos roncsolásmentes anyagvizsgálatok

Nr	Vizsgálatok megnevezése	Szabvány száma	Elfogadási kritérium	Megjegyzések
1	Héliumos lyukkeresés ¹	EN 13185,A1, EN1779, PAENG-7-019--89	10 ⁻⁹ Pam ³ /sec	Sok indikáció, javítás
2	Hőszokkolásos teszt ²	HNF házi előírás	Repedés és szivárgásmentesség	Repedést nem volt észlelhető
3	Röntgen átvilágítás több falon keresztül	HNF házi előírás	Dokumentáció szerinti térbeli elhelyezkedés	Megfelelő
4	Krio teszt ³	HNF/ANSTO előírás	Szivárgásmentesség -250C°	Megfelelt

5.táblázat

Az ipari gyakorlatban nem szokványos roncsolásmentes anyagvizsgálatok

- 1) A héliumos lyukkeresés a legfontosabb vizsgálatá vált. A kapott indikáció helyén csiszolás után cseppnyi hozaganyaggal ráhegesztéssel javítható. Bizonyos félkésztermékeknel gyakran jelentkezett tömörtelenség (gyártási „elszennyeződés” okozta porozitás vagy alapanyag hiba miatt)
- 2) Hőszokkolásnál 100C° hőmérsékletűre felhevített munkadarabot -250C°-ig visszahűtjük és kétszer megismételjük az egész folyamatot
- 3) A krio teszt speciális funkciópróba, ahol az egész berendezést munkahelyzetbe állítják felműszerezik és egy hengerbe helyezik el ahol létrehozható a legalacsonyabb működési hőmérséklet: 20K (kb -250C°)



6.ábra

Beépített csőszakaszok varratának helyszíni hőszokkolása cseppfolyós nitrogénnel



7.ábra

Az elemek elhelyezkedésének ellenőrzése röntgen átvilágítással a moderátor kamra belsejében a tartályok összehegesztése után

Előre meghatározott eljárásrend szerint minden lehetséges munka rezsimit lefuttatnak a berendezésen. Ez akár egy hétig is eltart. Ha minden folyamat az előírásoknak megfelelően lefutott és sikeres, akkor történik a berendezés átvétele.



8. ábra.

A krio teszthez készített tartályba behelyezik a legyártott, kész termoszfонт átfogó tesztelésre

5. Összefoglalás

A HNF cég saját forrásból egy világviszonylatban is jelentős terméket, nukleáris kutatóreaktorhoz alkalmazható hidegneutron forrást tervezett és gyártott.

Ehhez – szinte nulláról építkezve – megteremtette a személyi és tárgyi feltételeket egy speciális hegesztőüzem és vizsgáló labor létrehozásával, kidolgozta és tanúsította a gyártási know-how-t, alapvetően új ismereteket szerzett a vékonyfalú alumínium berendezések gyártásában és vizsgálatában.

A terméket sikerült rövid idő alatt (a műhely kialakításától a krio tesztiig – 1,5 év) és jó minőségben elkészíteni. A gyártmányokat az ausztrál nukleáris kutatóintézet szakmai bizottsága átvette.

A HNF cég igen kis létszáma és alacsony „overhead-je” miatt ár szempontjából igen jó pozíciót harcolt ki a berendezésének a nemzetközi piacon.

AUTOMATIZÁLT HEGESZTÉS PEREMFELTÉTELEI

PRECONDITIONS OF AUTOMATED WELDING

Lakos Szabina

OkI. Gépészmérnök
Hegesztőmérnök EWE/IWE

Mechanical engineer
Welding engineer EWE/IWE

Crown International Kft. – Cloos Magyarország
2142 Nagytarcsa Alsó Ipari Krt. 6.

Az egyre növekvő piaci verseny és vevő igények minden gyártóipari területen jelentős szereppel bírnak. A megrendelés aláírásától a vevők szinte azonnal szeretnék a terméket kézhez kapni, adott esetben termelni vele vagy használatba venni. Lépést kell tartani a piaci versenyben és kellően rugalmasnak kell lenni ahhoz, hogy ki tudjuk szolgálni a megrendelőket. A fejlesztés az egyetlen lehetőség, ami kiválthatja a kézi munkaerőt egy gyors, dinamikus és flexibilis eljárásra. A kézzel hegesztett termékeknél magas a gyártási idő és a varratok külalakja sem reprodukálható 100%-ban. Sok esetben a robotos, automatizált hegesztés jelenti a legnagyobb ugrást a kézi hegesztéshez képest. Az automatizált hegesztés bevezetéséhez különböző peremfeltételeket kell biztosítanunk, mint például a jó munkadarab konstrukció, kedvező varratgeometriák és hegesztési pozíciók, átgondolt robot elrendezési terv és kivitelezés, jól képzett robotkezelők, programozók, és munkavédelem. Ez a fejlesztési irány jelenti a jövőbeli versenyképesség alapját, a gyors vevői kiszolgálást, az átfutási és a gyártási idő minimalizálását. Az automatizálással járó előnyökkel, új technológiákkal tudunk lépést tartani a megnövekedett vevői igényekkel.

The increasing market competition and customer demands play an important role in all areas of manufacturing. After signing the order the customers would like to receive the product, or system and use it, start the production immediately. To keep step in the competition we need to be sufficiently flexible to be able to serve our customers. Hand-welded products have a high production time and the appearance of the seams is not 100% reproducible. To meet all requirements great progress needs to be made. In many cases, robotization, automated welding shows the biggest jump compared to manual welding. The introduction of automated welding must ensure various preliminary conditions, such as good workpiece construction, favourable seam geometries and welding positions, reasonable robot design and layout, well-trained robot operators, programmers, labour safety. This innovation guideline is the base for future competitiveness, fast customer service, and minimizing lead times and production times. With the benefits of automation and new technologies, we can keep up with the increased customer expectations.

AUTOMATIZÁLT HEGESZTÉS PEREMFELTÉTELEI

Bevezetés

A XXI. században társadalmunk és az ipar igényei egyre színvonalasabb gyártási kultúrát generálnak. Egyre magasabbak az elvárások, nemcsak a termékek minőségével kapcsolatban, hanem azok élettartamával, minőségi azonosságával és megbízhatóságával szemben is. Az elmúlt évek során egyre nőtt az igény az ipar részéről, hogy olyan gépeket, berendezéseket alkalmazzanak, amelyek segítségével meggyorsítják és automatizálják a termelést és képesek akár komplex feladatot is pontosan és rövid idő alatt elvégezni. A kézzel hegesztett termékeknél magas a gyártási idő és a varratok külalakja sem reprodukálható 100%-ban. A termelékenység javításáért ma a lehető legtöbb műveletet automatizálják, többek között a hegesztést is.



1. ábra

Az automatizálás, robotizálás az egyik legjobb választás, ha a termelékenység, hatékonyság és a minőség növelése a cél.

Az automatizálás nemcsak a minőség állandóságának szempontjából fontos, hanem napjaink egyre nagyobb problémáján is segít, azaz a munkaerőhiány pótlásán. A nagyobb termelési sebesség, amit az automatizálás révén elérhetünk, nem minden esetben elegendő. Sokkal fontosabb a minőség és állandó reprodukálhatóság megtartása.

Ha gépesíteni szeretnénk a termelésünket, akkor különböző irányokba indulhatunk el. Az automatizált hegesztés bevezetéséhez különböző peremfeltételeket kell biztosítanunk, mint például a jó munkadarab konstrukció, kedvező varratgeometriák és hegesztési pozíciók, átgondolt robotelrendezési terv és kivitelezés, jól képzett robotkezelők, programozók, munkavédelem.

1. Automatizált hegesztésre alkalmas konstrukció

A tervezés azt jelenti, hogy egy alkatrészt úgy kell kialakítani, hogy az gyártható legyen. Olyan feltételek mellett, amelyek garantálják a működését, és hogy az élettartama megfeleljen a specifikációknak, mindemellett pedig az előállítás gazdaságos legyen.

A konstrukció összekapcsolja a fejlesztő elképzeléseit a gyártási lehetőségekkel. Az eredmény sikere jelentős mértékben függ az érintettek kommunikációjától. Minél jobban össze tudja egyeztetni a tervező a fejlesztő ötletét a gyártás lehetőségeivel, annál kevesebb erőfeszítést igényel a megvalósítás.

Sajnos sokszor előfordul, hogy a fontos részleteket nem mindig veszik figyelembe, különösen a hegesztési varrat részleteit hanyagolják el gyakran a CAD rendszerek. Az automatizálás mértéke egyre növekszik, és új kihívások elé állítják a tervezőket.



2. ábra

A konstrukció fontos szerepet tölt be az automatizálás során.

Mi jellemzi a gyártmányrajzainkat? Használunk hivatkozásokat a jelenlegi szabványokra, előírásokra? Felhasználunk a hegesztési varratok kivitelezésére vonatkozó jelöléseket? Egyértelműek ezek a jelölések? Mit jelentenek a varrat minőségére szolgáló besorolási osztályok? A hegesztő kollégák értik ezeket? Egy nyelvet beszélnek? Vannak hegesztési utasításaink? Vannak hegesztési munkarendre vonatkozó tervek? Vannak előírt vizsgálati utasításaink? Ebben a pontban merül fel a kérdés, hogy meddig is terjed ki a tervező munkája:

- Munkadarab funkciója (statikus, dinamikus igénybevételek, varrat méretek, varrat mennyiségek)
- Gyárthatóság (hegesztőpisztoly hozzáférhetősége, megközelíthetőség hegesztő/robot, varratok helye)
- Lemezvastagságok megválasztása, átmenetei
- Élelőkészítés, hőhatásövezet hatásai
- Ellenőrizhetőség (szemrevételezéses vizsgálat, roncsolásmentes /PT, MT, UT, RT/ és roncsolásos anyagvizsgálatok)
- Reprodukálhatóság
- Geometria kialakítása (erővonalak, simaság, feszültségek, varratforlódás, igénybevételek)
- Hegesztési munkarend (hegeszthetőség, alakváltozások és sajátfeszültségek)
- Hegesztési eltérések (MSZ EN ISO:5817)
- Egyedi gyártói előírások (autóipar, vasút, hídépítés, etc.)
- Darabszám
- Egyebek (korrózió, hőhatások, dizájn)
- Gazdaságosság
-

A hegesztéstechnikai és hegesztett szerkezeti tervezéssel kapcsolatos átfogó tudására támaszkodva a hegesztett szerkezet tervezőmérnök feladata a hegesztett szerkezetek megtervezése és méretezése, a hegesztett alkatrészek és alkatrész csoportok vonatkozásában. Folyamatos kapcsolatban kell, hogy álljon a hegesztési felelőssel és a gyártás-, illetve szerelésvezetéssel. A munkadarab kialakítása és méretezése mellett a tervezés során szem előtt kell tartania a hegeszthetőségre és a szükséges hozzáférhetőségre vonatkozó szabályokat is.

Összefoglalva a jó eredmény elérésének érdekében fontos, hogy a fejlesztő, a tervező, a hegesztési felelős, a hegesztő és a programozó kommunikációja kielégítő legyen, és hogy egy nyelvet beszéljenek.

Egy robot „csupán” egy manuális hegesztő gépi alakja, mely számos előnnyel rendelkezik:

- termelékenység jelentős növekedése
- gyártási sebesség növelése
- folyamatosság
- magas terhelhetőség
- minőség
- ismételhetőség
- pontosság
- új eljárások alkalmazhatósága
- reprodukálhatóság
- ...

Egy kézi hegesztő bizonyos korlátok között kompenzálja az előkészítés pontatlanságait. A robot csak annyiban reagál a változásokra, amennyiben ezt figyelembe veszik a programozás során megfelelő szenzorok használata mellett.

A folyamatnak köszönhetően a kézi hegesztő folyamatosan ellenőrzi a hegesztést, és hegesztés közben a hibákat automatikusan javítja. Automatizált hegesztés esetén a kezelő nem nézi folyamatosan a hegesztés folyamatát, nem ellenőrzi az ömledéket, ezért nem minden esetben észlelheti a hegesztés során fellépő hibákat csak a hegesztés befejezésével. Fennáll annak a veszélye, hogy a kezelő programozás után túlságosan támaszkodik arra, hogy nem vizsgálja meg megfelelően a vizuálisan elfogadható varratot. A helyesen programozott varrat a későbbiekben is helyesen fog elkészülni - feltéve, hogy a külső körülmények nem változtak (kulcsszó: tűrések betartása az alkatrészek előkészítésében és összeállításában).

Alapvetően érvényes az a gondolat, hogy egy szerkezetnek először hegesztéstechnikai szempontból kell rendben lennie, még mielőtt robottechnikai szempontjából optimalizálni lehet. Aki ismeri a hegesztési folyamatot, az tudja hatékonyan alkalmazni azt. Emiatt a tervezőnek tudnia kell, hogy milyen folyamatok és eljárások állnak rendelkezésre.

Az automatizált hegesztésre alkalmas konstrukció tehát nem tér el a hegesztésre alkalmas konstrukciótól. Amiben különbség van, hogy automatizált vagy kézi hegesztésre szánunk egy terméket, az a gyártmány és az összeállítási pontosság betartása. A különböző hegesztési eljárások alkalmazásánál, szakirodalmakból és a gyártási tapasztalatokból ismert illesztések hegesztéstechnikai előírásai azonosak a robotizálásnál is, a különbség az, hogy az illesztési hézagok munkadarabonként lehetőleg azonosak kell legyenek.

A robotos gyártásra alkalmas tervezés egyenlő a hegesztéssel kivitelezhető tervezéssel és a hegesztés alapelveinek betartásával.

2. Átgondolt robot kivitelezési terv

A magasan automatizált hegesztési technológiák alkalmazásával a vállalatok jelentősen képesek növelni versenyképességüket. Egy hegesztés automatizálási feladata sokszor egyszerűbbnek tűnik, mint ahogy valójában gondolnánk. Első lépésként meg kell tervezni a hegesztőcellát oly módon, hogy az logisztikailag és technológiailag is megfeleljen az igényeknek.



3. ábra

QR-CS-60 robotrendszer, 1000kg terhelhetőséggel

Ezután következik a készülék tervezése, gyártása vagy meglévő átalakítása. A legtöbb esetben a termékek helyes készülékezése komoly kihívást hordoz magában.

Az átgondolt robot kivitelezési terv megalkotása a vevői igények felmérésével kezdődik, hogy megtaláljuk az optimális megoldást az adott feladatra. Az igényfelmérés alapja a hegesztendő munkadarab paramétereinek (alapanyag, befoglaló méretek, súly, tűrések, varrat pozíciók, hegesztéstechnológiai előírások, stb...) megismerése. Ehhez az a fontos információ is társul, hogy az automatizálást bevezetni kívánó vállalat kijelölje a termékpalletájából azokat a termékeket, melyet robotizálni

szeretne. Sajnos olyan rendszert nehéz megalkotni, mely minden méretű, súlyú, alapanyagú, más és más hegesztéstechnológiával hegesztendő munkadarabot képes befogadni. Amennyiben ismerjük a robotban hegeszteni kívánt termékeket, megkezdődhet az optimális, átgondolt, hatékony és termelékeny robotelrendezési terv kialakítása, szem előtt tartva a vevő igényeit, és a rendelkezésre álló helyet, infrastruktúrát. A feladatok kiosztása után a legmodernebb gépész tervező rendszerek segítségével a legapróbb részletig elkészül a berendezés 3D-s modellje. A robotelrendezési terv bemutatásra kerül a vállalat megbízott szakembereinek további egyeztetés, ötletelés céljából. Megfelelő -e a robot pozíciója (álló vagy függesztett), a robot munkaterületének mérete (7. tengely, vagy szükség van e kiegészítő tengelyekre), munkadarab befogása, pozicionálása stb. Ezekben a kérdésekben egy megfelelő tapasztalatokkal bíró szakember rengeteget tud segíteni, hogy a lehető legoptimálisabb robotrendszer kerüljön kiválasztásra.

A színes termékpalettával rendelkező Cloos vállalat egy kézben minden tartozékkal rendelkezik. A QINEO hegesztőgépekkel, QIROX robotokkal, standard és speciális pozicionálókkal és célgépekkel ügyfélspecifikus automatizált hegesztőrendszerek hozhatók létre. A termékválaszték az egyszerű mikrocelláktól, a kompakt rendszerektől, a gyártási láncba kapcsolt komplex megoldásokig terjed, amelyek már automatizált munkadarab-mozgatásra és munkadarab-azonosításra is képesek.

3. Személyi feltételek

Egy-két évtizeddel ezelőtt a legfejlettebb ipari országokban deklarálták egy új műszaki tudományág, a robotika megszületését. Eszerint a robotika olyan interdiszciplináris tudományág, melyben a mechanika, hidraulika, pneumatika, elektrotechnika, irányítástechnika, elektronika, számítástechnika egyes részterületei ötvöződnék. Az eddigiekből az is következik, hogy minden olyan szakember, aki ipari robotok tervezésével, gyártásával, üzembeállításával, alkalmazásával, programozásával, illetve vizsgálatával kíván foglalkozni, meghatározott szintű ismeretekkel kell rendelkeznie a korábban felsorolt tudományterületek közül.

A vállalatvezetők látták, hogy a robot nem betegszik meg, a robotok dolgozhatnak egymás mellett, megismerték az automatizálás, robotizálás előnyeit.



4. ábra

Ipari robotok, Cobotok szakszerű üzemeltetéséhez képzett dolgozókra van szükség

Ismeretes tény, hogy robotokra soha nem bízható olyan munka, amihez kell az ember alkalmazkodóképessége, alkotóképessége, rugalmassága és kreativitása. Egy gépet ma még nem lehet olyan szenzorokkal felszerelni, mint amilyenekkel az ember rendelkezik és nagyon sokára lesz még az, mikor egy gép úgy tud alkalmazkodni a változó feltételekhez, ahogy az ember.

A robotkezelőknek és a robotcellák felügyelőinek, akik a lehető leggyorsabban tudják elhárítani vagy megoldani a problémákat, óriási szerepük van a kiváló minőségű eredmények elérése és az optimális hatékonyság fenntartása tekintetében. Alapvető műszaki, valamint hegesztéstechnikai ismeretek megléte elengedhetetlen kritérium a személyzettel szemben.

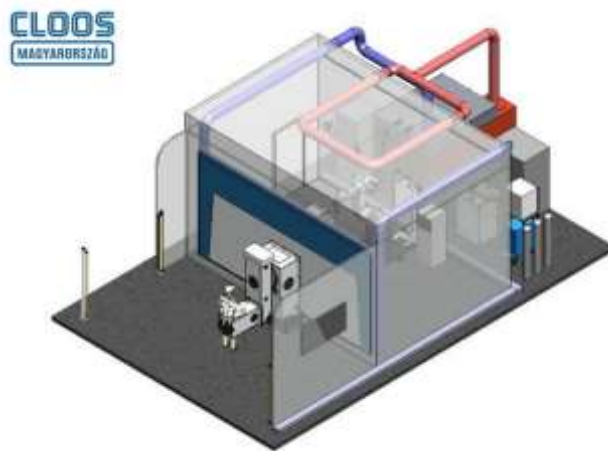
Az ipari robotrendszerek legyenek bármilyen korszerű biztonsági eszközökkel is ellátva, növeli a képzés jelentőségét a robotok üzemeltetésben. A robotrendszerek biztonságos üzemeltetése szempontjából azonban nem csak a szigorúan vett biztonságtechnikai ismeretek elsajátítása és naprakészen tartása fontos, hanem legalább ilyen fontos a robotrendszer működtetésére vonatkozó megfelelő ismeretanyag elsajátítása és szinten tartása.

4. Munkavédelem

A maximális biztonság érdekében nemcsak a robotokról, de azok megfelelő környezetéről is gondoskodni kell. A munkavállalókat képezni kell, valamint a vezetőket és az üzemvezetőket is fel kell készíteni az esetlegesen felmerülő veszélyforrásokra. A felkészítés azért is kiemelten fontos, mert az ipari robotok (Kobotok, önvezető targoncák, robotkarok stb.) egészen más veszélyeket hordozhatnak magukban, mint a munkavállalók eddig használt eszközei.

Az alkalmazott hegesztési eljárás sajátosságaiból adódóan elsődlegesen a hegesztési füst és a hegesztő ív káros hatásaitól kell védeni a munkavállalókat, annak ellenére, hogy a dolgozók az automatizált hegesztés esetén nem tartózkodnak a hegesztés közvetlen közelében. Be kell tartani az általános anyagkezelésre, anyagmozgatásra vonatkozó biztonsági előírásokat, és gondos odafigyelést igényel a dolgozók égési sérülések elleni védelme munkadarab csere közben is.

Az ívfény elleni védelem a robotcella biztonsági védőkerítésének megfelelő kialakításával oldható meg, betartva az erre vonatkozó biztonságtechnikai előírásokat.



5. ábra

Elszívástechnika, ívfényvédelem

A benyúlás, beesés elleni védelem kapcsán például a jelenlegi előírások alapján a védőkerítés magassága 2700mm, ez abban az esetben térhet el, ha a rendszer lézerekamerával is fel van szerelve. Munkaterület védelmet szoftveresen is állíthatunk, ezzel megakadályozva, hogy a kezelő a robotot véletlenül falnak, darunak vagy bármilyen más olyan tárgynak ütköztesse, ami folyamatosan jelen van a munkaterületen.

A hegesztési füst elszívásáról hegesztőrobotok esetében is megfelelő elszívó, szűrő rendszerek alkalmazásával kell gondoskodni, melynek kiválasztása a hegesztőeljárás, és a robotrendszer kialakítása alapján kerül sor.

A hagyományosnak tekinthető biztonsági védőkerítések, fénykapuk, fényfüggönyök, biztonsági-, szerviz ajtók mellett ugyanis olyan újdonság is megjelent a piacon, amely technikai és gazdaságossági előnyt is jelenthet a robotrendszereket üzemeltetők számára. Ilyen újdonság például a térszkenner, mely olyan plusz támogatást nyújt a meglévő biztonságtechnikai elemek mellett, mellyel azt is figyelemmel tudjuk kísérni, hogy a robotcellában marad-e olyan tárgy vagy személy, amely akadályozná a robot zavartalan működését, illetve ütközést vagy személyi sérülést okozhat.

Az elmúlt években a robotika fejlődésével egyidejűleg összhangban a robotok biztonsági rendszerei is sokat korszerűsödtek. A technikai fejlődéssel egyidejűleg a biztonsági előírások és követelmények szintén korszerűsödnek és egyre magasabb igényt támasztanak az üzemeltetőkkel szemben.

Összegzés

Sok esetben a robotos, automatizált hegesztés jelenti a legnagyobb ugrást a kézi hegesztéshez képest. A kézi hegesztés, hasonlóan sok más, fontos szakmához válságban van, ezért az iparnak sürgősen át kell állnia a gépesítésre. Gazdaságosan, kiváló minőségben és hatékonyan gépesítve lehet hegeszteni. Ezekkel az igényekkel néznek szembe a gyártók, ezeket és sok más szempontot figyelembe véve kell megtalálniuk az optimumot, és elkészíteni a terméket.

Ez a fejlesztési irány jelentheti a jövőbeli versenyképesség alapját, a gyors vevői kiszolgálást, az átfutási és a gyártási idő minimalizálását. Az automatizálással járó előnyökkel, új technológiákkal tudunk lépést tartani a megnövekedett vevői igényekkel.



6. ábra

Gyártási láncba kapcsolt komplex gyártósor

Irodalomjegyzék

- [1] <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-trends-robotics-2020>
- [2] <https://bdtechtalks.com/2020/01/22/robotics-automation-in-2020>
- [3] Dr. Farkas Attila: Hegesztőrobot-rendszerek biztonságtechnikája, 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia Budapest, 2010. május 19-21.
- [4] Hegesztőrobot rendszerek biztonságtechnikája - (docplayer.hu)
- [5] Cloos – online seminar: Construction suitable for welding

KORSZERŰ NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTETT ÉS EGYENGETETT KÖTÉSEINEK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED AND STRAIGHTENED JOINTS PRODUCED FROM ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS

Lama Mkanna

University of Dunaújváros, Dunaújváros, Hungary

lamamkanna@gmail.com

Dr. Bela Palotas

University of Dunaújváros, Dunaújváros, Hungary

palotasb@uniduna.hu

1. Introduction

Testing is usually performed to ensure that welded joints can fulfill their intended function. If a metal is uniformly heated and cooled there would be almost no distortion. However, because the material is locally heated and restrained by the surrounding cold metal, stresses are generated higher than the material yield stress causing permanent distortion. The principal factors affecting the type and degree of distortion, are: Parent material properties, Amount of restraint, Joint design, Part fit-up and Welding procedure. The ideal test, of course, involves observing the structure in actual or simulated service. AHSS are complex, sophisticated materials, with carefully selected chemical compositions and multiphase microstructures resulting from precisely controlled heating and cooling processes. Various strengthening mechanisms are employed to achieve a range of strength, ductility, toughness, and fatigue properties, and its used more and more, but we do not know what happened in steel after straitening. Therefore, standardized tests and testing procedures are performed in the laboratory to compare a specimen's results with those of metals and structures that have performed satisfactorily in service. Standardized testing provides a bridge between the properties assumed by designers and analysts and those exhibited by the actual structure. Mechanical testing provides information on the mechanical or physical properties of a small sample of welds or metals to infer the properties of the remaining material within a lot, heat range, or welding procedure. Standardized procedures are used to sample, orient, prepare, test, and evaluate the specimens in order to provide results that can be compared to design criteria. For example, virtually all design codes are based on a minimum tensile strength that must be achieved not only in the base metal but also in the weldment. The aims from this work are: First the WPS is a proven process of welding and is important to ensure welding operators in the field are maintaining the same, required standards across the board but there are some differences between the standards which we will compare between them. Second aim is to know whether there is a different in mechanical properties in welded and straitened condition of AHSS, because it is not known well, so we will compare mechanical properties of welded and welded and straitened joints, we are using in the experiments S500MC, S690QL and S960QL materials.

A hegesztett kötések készítésének velejárója a deformáció, amelyet sok esetben egyengetéssel csökkenteni kell. Az egyengetés egyik lehetősége a termikus egyengetés. Kevés ismeretünk van arról, hogy a nagyszilárdságú acélok tulajdonságai hogyan változnak termikus egyengetés után. Az előadás bemutatja 3 különböző szilárdságú acél (690-960-1100 MPa folyáshatárú acél) esetében azt, hogy a hegesztett állapotban mért mechanikai tulajdonságok hogyan változnak termikus egyengetés hatására. Tekintettel arra, hogy a kötéseknél szemcsedurvulást tapasztaltunk, feltételezhető volt, hogy a mechanikai tulajdonság változnak, a szilárdság csökken és az alakváltozó képesség is romlik.

2. THE RESULTS OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED AND AFTER WELDING STRAITENED JOINTS

According to the results of Mr. SABBABI Houssam diploma thesis for MSC the tittle is **REDUCTION OF DEFORMATION OF WELDED ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL** in university of Dunaujvaros, May 2019. he proved the straightening reduce the distortion of joints but after straightening the grain size increase, so the tensile strength is smaller, and the mechanical properties became worse, so we cannot avoid we have to reduce. We continue the testing of this welded joints which is carried out by Mr. Hussam, it will be shown in the following.

2.1 Material and Sample Used in Experiment

Samples used in this study are S500MC, S690QL and S960QL, those steels are especially known for its highest combination of mechanical strengths and ductility under the heat-treated conditions, and therefore has been widely used in aerospace industry for the last 40 years. The geometry of the samples is sketched in **Figure 1**. It is a 10 mm thick with

length of 300 mm width and 350 mm length, the same geometry will be used for all our samples and the WPS-s prepared by Dr. B. Palotas my supervisor.

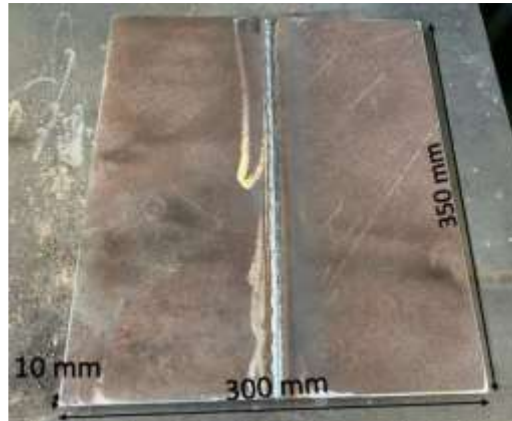


Figure 1.
Material dimension used in experiment

As welding process, we used Gas Metal Arc Welding (GMAW), sometimes referred to by its subtypes metal inert gas MAG wire welding or metal active gas (MAG) welding, is a welding process in which an electric arc forms between a consumable MAG wire electrode and the workpiece metal(s), which heats the workpiece metal(s), causing them to melt and join. Along with the wire electrode, a shielding gas feeds through the welding gun, which shields the process from contaminants in the air. see **Figure 2.**



Figure2.
GMAW welding equipment used during experiment

2.2 Material Straightening

We applied the straightening using flame straightening technology. As small definition flame straightening is an efficient and long-established method of correcting the distorted parts. Flame straightening is based on the physical principle that metals expand when heated and contract when cooled See **Figure 3.**

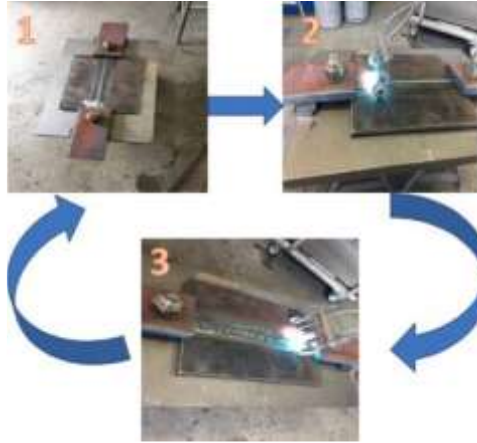


Figure3.
Straightening steps used for our experiment

2.3 Microstructure After Straightening

We used ZEISS AXIO OBSERVER Z1M optical microscope for checking the microstructure- true changes in straitened materials in order to compare it with microstructure change received after welding, for that we will use the equation below (3.2) the number correlated with grain size as shown in **Figure 4**.

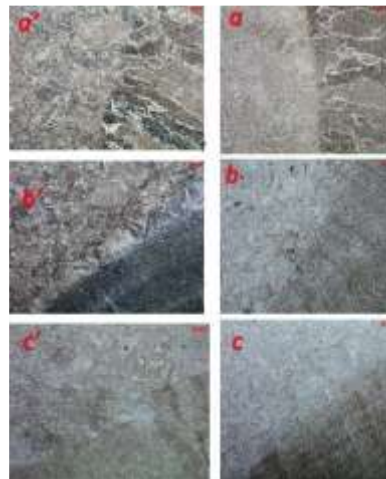


Figure4.
The microstructure difference before and after straightening: (a)S500MC before straitening, (a') S500MC after straitening, (b)S690QL before straitening, (b') S690QL after straitening, (c)S960QL before straitening, (c') S960QL after straitening

According to the results of Mr. Hussam, he proved the straightening reduce the distortion of joints after straightening. We continue the testing of this plates which is carried out by Mr. Hussam, it will be shown in the following.

3. DIFFERENT TEST OF JOINTS AND WELDED MATERIALS

Materials testing breaks down into five major categories: mechanical testing; testing for thermal properties; testing for electrical properties; testing for resistance to corrosion, radiation, and biological deterioration; and non-destructive testing [1]. Standard test methods have been established by such national and international bodies as the International Organization for Standardization (ISO), with headquarters in Geneva, and the American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia.

There are many methods to test the mechanical properties for the welded materials and the welded joints, we will mention only the methods that we carried out in our experiments for testing the mechanical properties for the welded joints:

- X-ray testing,
- Hardness testing,
- Tensile test,
- Impact test.

3.1 X-ray testing

Here the results shown in the **Figure 5**. Where is a black line there is defect.
As we can see in the **Figure 5**. most of the defects are slag inclusions.



Figure5.
The X-ray testing result

3.2 Cutting of samples

On the bases of the X-ray testing, we plan to cut the samples as it is shown in the **Figure 6**.

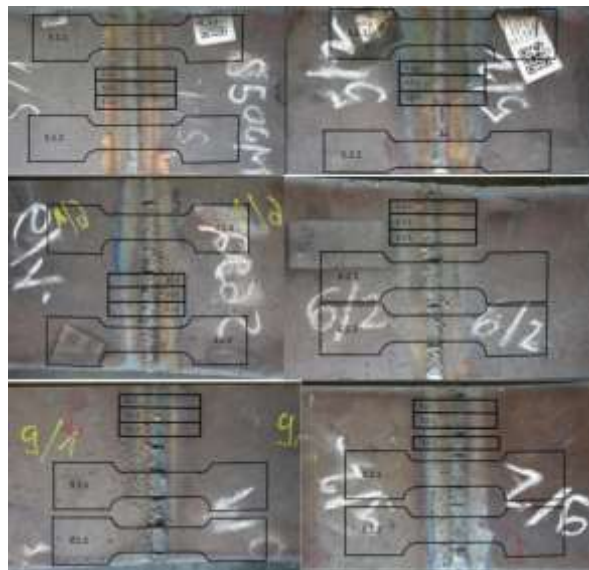


Figure 6.
Samples cutting

3.3 Hardness test

Hardness testing of welds is a subgroup of the Vickers hardness test. The purpose of these hardness tests is to show the hardening, the strength of the weld is measured by tensile test, with focus on hardness around the heat-affected zone (HAZ). This is because the hardness in and around the HAZ can help evaluate the brittleness of the weld and can therefore help you determine whether the weld has the strength you require. Hardness testing of welds can be performed on any Vickers micro hardness testing machine.

When hardness testing of welds, a series of measurements are made in each pattern at a specific distance from the sample edge or top of the weld. The progression of the hardness values can then be plotted in a graph [52].

Methods typically used: HV1

Applicable standards: ISO 9015-1/-2

The **Table 1** shows the results of our samples, see **Figure 7**. shows the materials macro-section, the numbering of the measurements of our samples.

	HV1,10x,10Sec												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5.1	192	243	206	229	178	193	198	195	223	238	164	172	178
5.2	211	216	212	206	183	221	190	204	207	219	161	177	170
6.1	240	265	249	253	275	365	288	361	270	260	232	272	282
6.2	229	245	247	245	238	270	249	270	245	239	229	262	282
9.1	310	339	313	343	316	398	310	385	320	329	270	326	357
9.2	310	339	310	333	329	296	336	302	329	333	285	310	353

Table 1
Hardness results

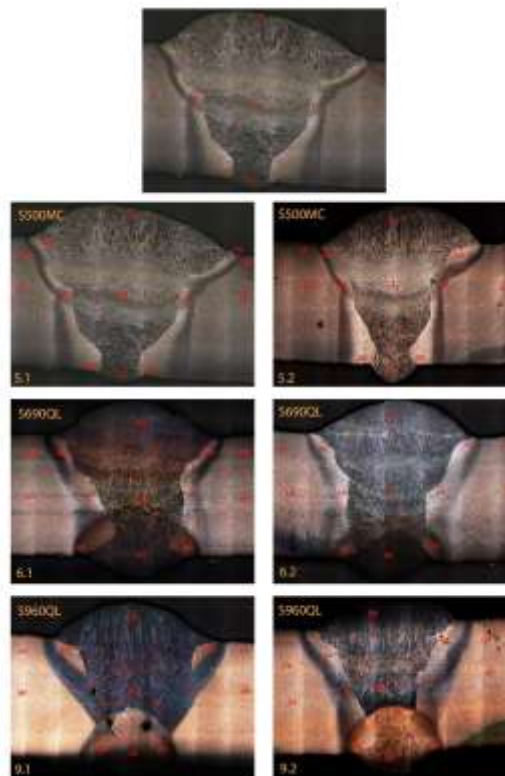


Figure 7.
The materials macro-section

3.4 Tensile test

In **Figure 8.** shown the specimen for the test with the geometric data and the preparation for the specimens in the lab before the testing in **Figure 9.** below, for the tensile test we carried out two samples from each material.

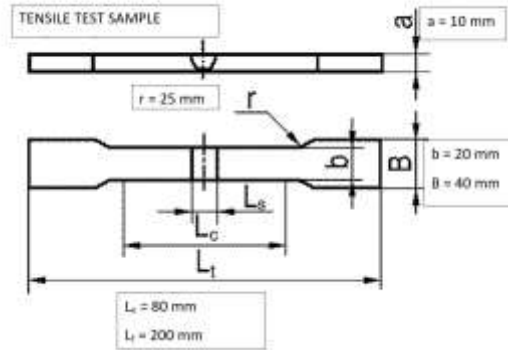


Figure 8.
Tensile specimen

Vienpatin atviena / Test ID	Skaidinys / Original width (mm)	Vienagalis / Original thickness (mm)	Kermetinis / Cross-sectional area (mm ²)	Signatūrinis / Yield strength Rp0.2 (N/mm ²)	Laipsniškas / Minimum force Fm (N)	Stipris / Tensile strength Rm (N/mm ²)	A5 skaidinys / Percentage elongation (%)	A80 skaidinys / Percentage elongation (%)	Remonto / Location of break
5.1.1	19.91	7.807	155.437	510	96087	618	6.7	5.6	Varnat / Weld metal
5.1.2	19.93	7.819	155.833	467	88789	570	5.5	4.2	Varnat / Weld metal
5.2.1	20.00	7.832	156.64	507	93979	600	8.0	6.1	Varnat / Weld metal
5.2.2	19.98	7.835	156.543	499	99460	635	12.5	10.4	Varnat / Weld metal
6.1.1	20.14	7.834	157.777	517	84255	534	3.9	2.6	Varnat / Weld metal
6.1.2	20.05	7.798	156.15	672	122146	781	8.2	7	Varnat / Weld metal
6.2.1	20.02	7.839	156.937	601	117073	746	13.4	11	Welded joint / Heat affected zone
6.2.2	19.98	7.846	156.763	632	116689	744	9.0	8.6	Varnat / Weld metal
9.1.1	19.93	7.849	156.431	-	52965	339	1.6	0.2	Varnat / Weld metal
9.1.2	19.98	7.865	157.143	-	55771	355	1.1	0.3	Varnat / Weld metal
9.2.1	20.01	7.822	156.518	655	111411	712	2.6	1.8	Varnat / Weld metal
9.2.2	20.11	7.842	157.703	740	122073	774	3.9	2.6	Varnat / Weld metal

Table 2
The results of the tensile test for the samples



Figure 9.
The specimens in the lab before the testing

After the testing, the mechanical properties calculated shown in **Table 2.** and the samples shown in the **Figure 10.**

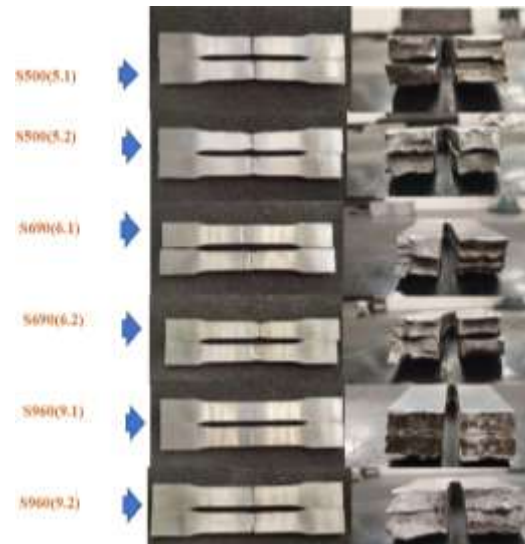


Figure 10.
Photos of the samples after the testing

The stress-strain curve here in the **Figure 11.** below and our samples classified by colours as you can see in the diagram .

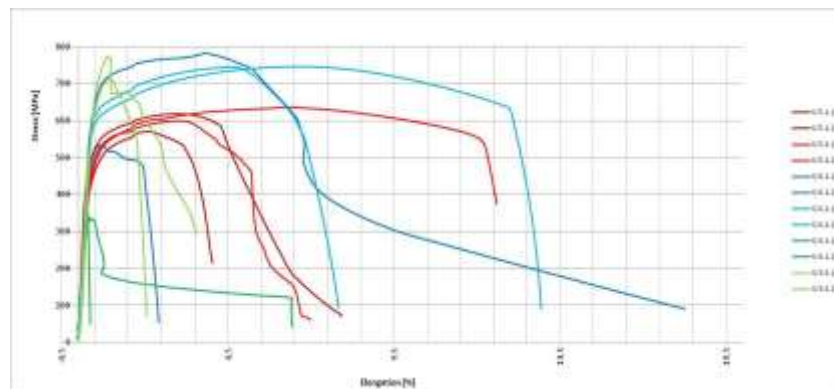


Figure 11.
Stress-strain curve

3.5 Impact test

In **Figure 12.** shown the specimen for the test with the geometric data and the preparation for the specimens in the lab before the testing in **Figure 13.** below, for the impact test we carried out three samples from each material due to the thickness of test plate, we had to reduce the thickness of impact sample to 7.5mm, and the requirements as well we have to reduce.

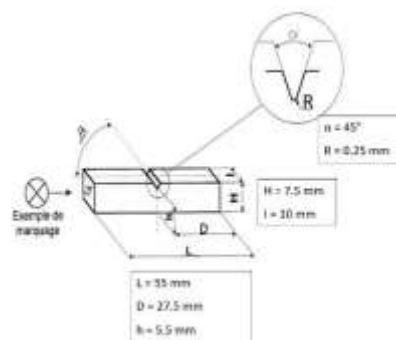


Figure 12.
Impact specimen

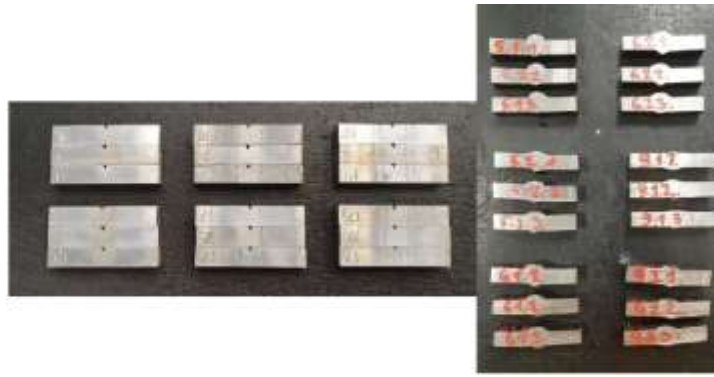


Figure 13.

The specimens in the lab before the testing

After the testing, the impact energy measured shown in **Table 3.** and the samples that we choose two of them shown in the **Figure 14.**

Vizsgálati azonosító Test ID	Ütőérték / Absorbed Energy [J]	Vizsgálati hőmérséklet Test Temperature [°C]
5.1.1	78	-20
5.1.2	77	-20
5.1.3	77	-20
5.2.1	96	-20
5.2.2	97	-20
5.2.3	72	-20
6.1.1	55	-20
6.1.2	51	-20
6.1.3	49	-20
6.2.1	53	-20
6.2.2	56	-20
6.2.3	57	-20
9.1.1	57	-20
9.1.2	52	-20
9.1.3	23	-20
9.2.1	24	-20
9.2.2	51	-20
9.2.3	20	-20

Table 3

The results of the impact test for the samples



Figure 14.

Photos of the samples after the testing one is ductile, and one is brittle

4. Conclusion and evaluation of results

To conclude our work and results so for the hardness test the same results, before and after the straightening, normal distribution was found, in S960QL maybe the preheating was not enough because the hardness in the heat effected zone was more than 380 Vickers. For the tensile testing after the straightening: in the sample S500MC the straightening does not reduce the tensile strength because our goal was to know if it reduces or not reduce, in S690QL the straightening does not reduce the tensile strength. For the impact testing after the straightening, in the case S960QL it reduces the impact energy it means was a little more brittle but, in the case, S500MC the straightening does not reduce the impact energy and in the sample S690QL the straightening does not reduce the impact energy as well, after we calculate the average of the impact energy to our samples, we found that after the straightening equals to 44 [J] its approximately the same with the value before the straightening. So, after the straightening S500MC, S690QL the mechanical properties do not reduce according to our results. In another experiment (Gyura Laszlo, Hegesztes Technika, 2019) they carried out the same test in the case of different strength steels and they found out the impact energy was not reduced, and the tensile strength was reduced by their results. To compare the results, we have to continue the testing because there is a small conflict (Mr. Hussam received that the grain size was increased) in the results it will be useful to continue the experiments to solve this problem.

5. SUMMARY

Comparison of mechanical properties of welded and straitened joints it is very interesting topic because it not really known if the straightening effect the mechanical properties of the welded joints for AHSS, so the goal of this work is to compare the mechanical properties of the welded and welded straightening joints. Previous in the Mr. Hussam diploma thesis proved that the flame straightening reduce the distortion and according to his results grain size is increased due to the heating but he didn't test the welded joints so we carried out the samples so first we had to cut out them but before we had to see if there is defect or not to know from where we can cut so we made the X-ray testing first and after the hardness, tensile and impact tests and after that we found that in S960 the impact energy reduce because a little brittle, one of our samples which is S960(9.1) we could not compare the mechanical properties because was defect in the sample. We have to continue the test. For the experiments were carried out the x-ray, hardness, tensile and impact tests as we can see from the results before how the straightening effects smoothly, it means the mechanical properties did not reduce very much. In the future they have to carry out more experiments.

Acknowledge

The authors would like to thank EFOP-3.6.1-16-2016-00003 project "Long-term strengthening of R & D & I processes at the University of Dunaújváros".

REFERENCES

- [1] Cobb, Harold M. (2010). The History of Stainless Steel. Materials Park, OH: ASM International, Retrieved 8 March 2020.
- [2] Davis, Joseph R.: Tensile testing (2nd ed.), ASM International, Columbus, Ohio, 2004.
- [3] Kazakov, N.F (1985). "Diffusion Bonding of Materials". University of Cambridge. Archived from the original on 2013-09-01. Retrieved 2011-01-13.
- [4] Tohru Nobuki, Minoru Hatate, Toshio Shiota, Materials Sciences and Applications, Vol.8 No.13, December 8, 2017.
- [5] Welding handbook, Prepared under the direction of the Welding Handbook Committee Cynthia L. Jenney Annette O'Brien Editors, 9th edition, welding processes part1, chapter 2, pages 82,8385,86,87,90.
- [6] Non-Destructive Testing Service for All of Florida, 3 Things to Know About Industrial Radiography for Welded Joints, Aug 02, 2019.

MIT ÉS HOGYAN TANULHATUNK A CSŐTÁVVEZETÉKEK KÖRVARRATAINAK KÁRESETEIBŐL?

WHAT AND HOW CAN WE LEARN FROM THE GIRTH WELDS DAMAGES OF TRANSPORTING PIPELINES?

Lukács János
Miskolci Egyetem,
3515 Miskolc, Egyetemváros

janos.lukacs@uni-miskolc.hu

Koncsik Zsuzsanna
Miskolci Egyetem,
3515 Miskolc, Egyetemváros

zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Chován Péter
FGSZ Földgázszállító Zrt.,
H-8600 Siófok, Tanácsház u.5.

PChovan@fgsz.hu

Török Imre
Miskolci Egyetem
3515 Miskolc, Egyetemváros

metti@uni-miskolc.hu

A csővezetékek elemei körvarratokkal kapcsolódnak egymáshoz és ezek jelentős hányada terepi körülmények között készül, a meghatározó hegesztéstechnológia a bevont elektródás kézi ívhegesztés. Az üzemelő vezetékek körvarratai több műszaki kultúra sajátosságait hordozzák, egységes megítélésük ellentmondásos, ma már nem ritkák az eredeti tervnél kétszer, de akár háromszor hosszabb ideje üzemelő vezetékek sem. Bemutatjuk, hogy a komplex gondolkodás és az élenjáró műszaki megoldások alkalmazása együttesen növelheti csak a csővezetékek üzemeltetési biztonságát.

Pipeline elements are joined with girth welds and considerable proportion of these girth welds is created under field circumstances; the main welding process is a manual metal arc welding. The girth welds of operating pipelines reflect the specialties of different technological culture, their uniform assessment is contradictory, as for today the operation of pipelines for twice or three times longer time as it was planned. It is pointed out, that complex consideration and the application of high-tech technical solutions can only together improve the operation safety of pipelines.

1. Bevezetés

A csővezetékek, így a szénhidrogén-szállító csővezetékek elemei is körvarratokkal kapcsolódnak egymáshoz. Ezeknek a körvarratoknak a jelentős hányada terepi körülmények között készül, a meghatározó hegesztéstechnológia a bevont elektródás kézi ívhegesztés. A vezetékek építések kezdeti időszakában, világszerte, 25 éves élettartamban gondolkodtak a tervezők és az üzemeltetők, amely a későbbiekben, az üzemeltetők tapasztalatok birtokában, a vezetékek különböző vizsgálatokkal bizonyított kedvező állapota ismeretében, valamint a működtetési és a gazdasági kényszerek miatt folyamatosan hosszabbodott. Fontos szerepe volt még ebben a csővezeték elemek, különösen a csövek, anyagminőség, gyártás- és korrózióvédelmi technológiai fejlesztéseinek, illetve a kivitelezési, majd az üzemeltetés közbeni vizsgálati technológiák fejlődéseinek is. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy az üzemelő vezetékek körvarratai több műszaki kultúra sajátosságait hordozzák, egységes megítélésük ellentmondásos, hiszen ma már nem ritkák az eredeti tervnél kétszer, de akár háromszor hosszabb ideje üzemelő vezetékek sem.

A nagyléptékű műszaki fejlődés ellenére, világszerte rendszeresek a körvarratok okozta meghibásodások, haváriák, amelyek tevékenységeik újra- és átgondolásra készítetik a kivitelezőket, az üzemeltetőket, valamint a szabályokat előírókat egyaránt.

2. A szénhidrogén-szállító csővezetékek káreseteiről

A szénhidrogénszállító csőtávvezetékek káresetei általában jelentős károkat okoznak, az anyagi és a környezeti károk mellett, gyakorta emberi életet is követelve. Az 1. táblázat összefoglal néhány jelentős és jelentős hatású külföldi, Belgiumban (BE), illetve az Amerikai Egyesült Államokban (USA) bekövetkezett káresetet.

Kód	D, mm	p, bar	Anyag	Hiba jelenség	Hiba oka
BE [1]	1015	71	X70	gázrobbanás, tűz	harmadik fél által okozott hiba
USA1 [2]	kb. 400 (18 inch)	kb. 59 (854 psig)	X52	robbanás	külső pittingekből induló SCC, elsősorban a hosszvarratban
USA2 [3]	kb. 800 (30 inch)	N/A	X52, X42	gázrobbanás, tűz	a csövet csak a külső oldalán hegesztették össze, amit később sem vettek észre; repedés a hosszvarratban, amely szívósan majd fáradásosan terjedt
USA3 [4]	kb. 500 (20 inch)	kb. 64 (929 psig)	X60	törés, égés	külső korrózió, körülbelül 70%-os falvastagság veszteséggel
USA4 [5]	DN 750	kb. 47 (675 psig)	X52	robbanás	súlyos belső korrózió

1. táblázat

Néhány jelentős és jelentős hatású káreset

Az 1. ábra az USA3 jelű, a 2. ábra pedig az USA4 jelű káreset egy-egy jellegzetes képét mutatja. Az USA4 jelű káreset azért is kiemelt jelentőséggel bír, mert egyik közvetlen előzménye volt a gázszállító csőtávvezetékek integritására vonatkozó előírás [6] kiadásának.



1. ábra

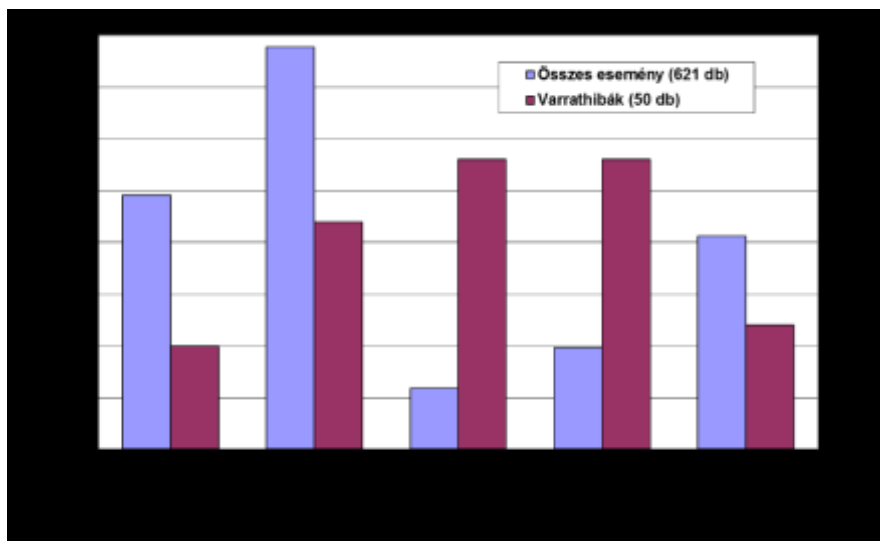
A Columbia Gas Transmission Corporation csővezetékének károsodása (Sissonville, West Virginia) [4]



2. ábra

A new-mexico-i (Carlsbad) gázvezeték robbanás károsodott csőszakasza [5]

A káresetekben gyakran érintettek a körvarratok, a [7] tanulmány egy hat és fél éves időszak jelentésre kötelezett eseményeit foglalja össze. A 3. ábra az összes esemény (621 db) és a varrathibák (50 db) okainak eloszlását mutatja, az öt fő okcsoport szerint.



3. ábra

Az összes esemény és a varrathibák megoszlása [7]

Az ábra szemléletesen mutatja az összes esemény és a varrathibák okcsoport közötti eloszlásának különbözőségét. Nincs okunk feltételezni azt, hogy a varratok kedvezőbb helyzetben vannak a korrózió és a külső erő szempontjából, mint a vezetékek más részei, így azt kell mondanunk, hogy a varratok a konstrukció és az anyaghibák okán veszélyeztetettebbek, mint a vezetékek más részei.

3. A körvarratok megítélése

A különböző anyagminőségű, geometriájú (külső átmérő, falvastagság) és terhelésű csővezetékek igen nagy számú körvarratot tartalmaznak. (A hazai, nagynyomású földgázszállító rendszerben mintegy 800 ezer körvarrat található.) Ezek a körvarratok eltérő műszaki körülmények és feltételrendszer keretében készültek és nem volt azonos az átvételükkor alkalmazott előírás rendszer (filozófia) sem. A gondolatkörben két elem kiemelése indokolt. Egyrészt, a jelen időszakban működő csővezeték rendszerek nagyobb hányada olyan, amelynek körvarratait gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok alapján helyezték üzembe. Ugyanakkor – épp a műszaki haladás következményeként – alapvető üzemeltetői érdeké vált, hogy a körvarratokban lévő eltéréseket (hibákat) ne elfogadhatósági, hanem határkritériumok alapján értékeljük. Másrészt, egyértelműen bizonyított, hogy a körvarratok hibátűrése – mind abszolút, mind pedig relatív értelemben – nagy [7], [8]. Ez azt jelenti, hogy körvarratok üzemelnek olyan eltérésekkel (hibákkal), amelyeket az elfogadhatósági kritériumok alapján nem megfelelőnek kellett volna minősíteni, ha vizsgálták volna azokat és/vagy az eltéréseket ki tudták volna mutatni.

Mindezek alapján nem véletlen tehát, hogy a *European Pipeline Research Group* (EPRG) irányelvének [9], [10] szakmai háttere két témakör megvilágításával érthető meg. Az egyik témakör a roncsolásmentes vizsgálatok területe, azon belül pedig a megengedhető hibaméretet befolyásoló tényezők és kölcsönhatásuk elemzése, továbbá a hibakimutatói módszer, illetve annak tökéletesítése. A másik témakör a műszaki kritikai értékelés (*Engineering Critical Assessment* = ECA), azon belül a gyártmánykivitel és a célra való alkalmasság (*Fitness for Purpose* = FFP) kölcsönhatása, valamint a hegesztési eljárások befolyásoló hatása, illetve a valós varratjellemzők szerepe.

3.1 Gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok

Ezeket a kritériumokat szabványok rögzítik, amelyek közül néhány jellegzetest felsorolunk [11]-[18], tudatosan olyanokat, amelyek korábbi időszakokban voltak hatályban.

A gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok fő korlátai a következők szerint foglalhatók össze:

- a hibaelfogadhatósági korlátok igaz/hamis kritériumokra épülnek;
- a biztonság elsődlegesen az ismeretlen tényezők, másodlagosan pedig az ismert tényezők nagyságának hiánya miatt nem számszerűsíthető;
- a működő vezetékekben vannak olyan hibák, amelyek a gyártmánykiviteli kritériumoknak nem felelnek meg, mégsem veszélyeztetik a csővezetékek biztonságát;
- az esetleges javítás többet árthat a körvarrat és azon keresztül a vezeték integritásában, mint a be nem avatkozás;
- a minősítési követelmények minden csővezetékre érvényesek, függetlenül a cső átmérőjétől, a cső falvastagságától, a cső anyagminőségétől, a varratfém és az alapanyag szilárdságának viszonyától, valamint a csővezeték üzemeltetési feltételeitől.

Ugyanakkor ki kell hangsúlyozni, hogy a gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok elsődleges eszközei a minőségbiztosításnak és fontos pszichológiai szerepet töltenek be a hegesztést végző személyek tevékenységében.

3.2 Műszaki kritikai értékelés

A műszaki kritikai értékelés során a megengedhető hibaméretet befolyásoló tényezők a következők [19]-[21]:

- teherbírási követelmények, amelyek lehetnek feszültség és/vagy alakváltozás alapúak;
- a hegesztett kötés jellemzői, benne a matching problémakör;
- a hibák (eltérések) típusai;
- a cső geometriai méretei, különös tekintettel a falvastagságra, mert a gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok konzervatizmusa a falvastagság növekedésével nő;
- a vizsgálati lehetőségek.

A műszaki kritikai értékelés alapfilozófiája tehát nem más, mint kapcsolat teremtése a hibaterület üzemi igénybevétele, valamint mechanikai tulajdonságai (mindenek előtt szívóssága) között. A kapcsolatra természetesen mind a képlékeny tönkremenetel, mind pedig a ridegtörés esetére szükség van. A kapcsolat megteremthetősége három vonatkozásban jelent információ igényt, illetve tételez fel meglévő információkat: egyrészt a terhelés oldalán; másrészt a teherbírás oldalán; harmadrészt pedig a hiba(terület) vonatkozásában, azon belül a hiba helyzete, a hiba hossza és a hiba falvastagsághoz viszonyított magassága terén.

Mindezek nyilvánvalóan szilárdságtani, törésmechanikai, mechanikai anyagvizsgálati, roncsolásmentes anyagvizsgálati feladatokat jelentenek, szükségszerűen rendszer-szemléletben. A műszaki kritikai értékelés elvégzéséhez vannak előírások (kódok), közöttük csővezeték specifikusak, illetve ilyen részeket tartalmazók ([17] legújabb, 21. kiadása (2013), [22]-[24]), amelyek közül kiemelendő az EPRG irányelv [9], [10], hiszen az kifejezetten a csővezetékek körvarrataira vonatkozik.

4. A European Pipeline Research Group irányelve

Az EPRG irányelvek szakmai háttérének és maguknak az irányelveknek az áttekintése alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- A körvarrat hibák minősítésének racionalizálása gazdasági igény és szükségszerűség.
- A körvarratok hibátűrése nagy, ezért a minősítés racionalizálásában nagyobb szerepe van a műszaki kritikai értékelés fejlesztésének, mint a roncsolásmentes vizsgálati módszerek tökéletesítésének. (Hangsúlyozni érdemes, hogy utóbbi ráadásul nem üzemeltetői feladat!)
- A gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok több korláttal bírnak – vagyis konzervatívak –, ugyanakkor elsődleges eszközei a minőségbiztosításnak és fontos pszichológiai szerepet töltenek be. Ezzel egyúttal azt is állítjuk, hogy alkalmazásukra továbbra is szükség van.
- A célra való alkalmasság kritériumának alkalmazása több és más mennyiséget kíván, mint a gyártmánykiviteli kritérium.
- Ez az anyagi mérőszámokra és a geometriai jellemzőkre egyaránt vonatkozik.
- A műszaki-kritikai értékelés alapfilozófiája – a hibaterület üzemi igénybevétele és mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolat teremtése – információ igényt fogalmaz meg a teherbírás és a hibaterület oldalon egyaránt.
- A varratfém és az alapfém folyáshatárának viszonya (matching) fontos jellemző a hibák értékelése során.

5. Összegzés

A csővezetékek, illetve azok körvarratainak sajnálatos káresetei mindenek előtt azt az üzenetet hordozzák, hogy a gyártmánykiviteli (elfogadhatósági) kritériumok alkalmazása nem elégséges a körvarratok minőségének, és különösen élettartamának a megítélésére. Ehhez olyan módszerre van szükség, amely megfelel a kor követelményeinek, visszatükrözi az üzemeltetői tapasztalatokat, továbbá érvényesíti az ésszerű kockázatvállalás és a biztonságra való törekvés kompromisszumát. Ezeknek a műszaki kritikai értékelési módszereknek mindenképpen építeniük kell a roncsolásmentes vizsgálatok eredményeire, így azoknak is egyre szigorúbb követelmények [25], [26] kell megfelelniük.

Irodalomjegyzék

- [1] Rupture and ignition of a gas pipeline 30 July 2004 Ghislenghien Belgium. French Ministry for Sustainable Development - DGPR / SRT / BARPI, No. 27681. https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_27681_Ghislenghein_v_2004ang.pdf
- [2] NTSB/PAB-13/01: Rupture of Florida Gas Transmission Pipeline and Release of Natural Gas. Pipeline Accident Brief: National Transportation Safety Board, Washington, D.C. 20594, 2013, pp. 1-17.
- [3] NTSB/PAR-11/01: Pacific Gas and Electric Company Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire, San Bruno, California, September 9, 2010. Pipeline Accident Report: National Transportation Safety Board, Washington, DC, 2011, pp. 1-153.
- [4] NTSB/PAR-14/01: Columbia Gas Transmission Corporation Pipeline Rupture, Sissonville, West Virginia, December 11, 2012. Pipeline Accident Report: National Transportation Safety Board, Washington, DC, 2014, pp. 1-50.
- [5] NTSB/PAR-03/01, PB2003-91650: Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico, August 19, 2000. Pipeline Accident Report: National Transportation Safety Board, Washington, DC, 2003, pp. 1-66.
- [6] ASME B31.8S – 2001: Managing System Integrity of Gas Pipelines. ASME, 2002.
- [7] Robert J. Eiber, D. J. Jones: Topical Report on an analysis of reportable incidents for natural gas transmission and gathering lines June 1984 through 1990. Line Pipe Research Supervisory Committee of the Pipeline Research Committee of the American Gas Association, Battelle, Columbus, 1992.
- [8] Rudi M. Denys: Girth-weld defect qualification methods need to be rationalized. Part 1: Focusing on mechanical properties in Engineering Critical Assessment saves money. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 9, September 1999. pp. 35-41.

- [9] Gerhard Knauf, Phil Hopkins: The EPRG guidelines on the assessment of defects in transmission pipeline girth welds. 3R International, 35. Jahrgang, Heft 10-11/1996, pp. 620-624.
- [10] Gerhard Knauf, Jan Spiekhout: EPRG's view of pipeline integrity developments beyond 2000. 3rd International Pipeline Technology Conference, Brugge, May 21-24, 2000. Elsevier, 2000. Vol. I, pp. 27-38.
- [11] MSZ 6442-71: Acélszerkezetek ömlesztőhegesztéssel készített kötéseinek és szerkezeti elemeinek gyártási követelményei.
- [12] MSZ 13833/4-82: Kazánok és nyomástartó edények gyártása és vizsgálata. Hegesztett kötések vizsgálata és minősítése.
- [13] MSZ-14-01052-1991: A bányahatóság felügyelete alá tartozó acél csővezetékek hegesztett körvarrataival szemben támasztott radiográfiai követelmények.
- [14] MSZ 6442-79 M (1983): Acélszerkezetek ömlesztőhegesztéssel készített kötéseinek és szerkezeti elemeinek gyártási követelményei.
- [15] MSZ 138833/4-82 M (1985): Kazánok és nyomástartó edények gyártása és vizsgálata. Hegesztett kötések vizsgálata és minősítése.
- [16] MSZ EN 26520: 1994: Fémek ömlesztőhegesztéssel készített kötéseiben lévő eltérések besorolása.
- [17] ANSI/API STD 1104-1994: Welding of Pipelines and Related Facilities.
- [18] BS 4515: 1996: Specification for Welding of steel pipelines on land and offshore.
- [19] Rudi M. Denys: Standard weld-defect judging model needs some research. Part 3: Industrywide cooperation could lead the way to fewer unneeded repairs of girth-weld defects. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 11, November 1999. pp. 69-74.
- [20] Rudi M. Denys: Weld-defect acceptance models need more validated inputs. Part 2: Using good mechanical, toughness and defect-size data could reduced unneeded repairs. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 10, October 1999. pp. 59-64.
- [21] Rudi M. Denys: Consensus on judging multi-level weld defects would benefit all. Part 4: Economics may eventually be the lever to bring a change from current assessment methods. Pipe Line and Gas Industry, Vol. 82, No. 12, December 1999. pp. 60-65.
- [22] CAN/CSA-Z184-M92: Gas Pipeline Systems.
- [23] BS 7910: 2019: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- [24] DNVGL-RP-F101: 2019: Corroded pipelines.
- [25] Qingshan Feng, Rui Li, Baohua Nie, Shucong Liu, Lianyu Zhao, Hong Zhang: Literature Review: Theory and Application of In-Line Inspection Technologies for Oil and Gas Pipeline GirthWeld Defection. Sensors 2017, 17 (1): 50; doi:10.3390/s17010050.
- [26] Mirmajid Ghaemi: Codes for Automatic Ultrasonic Testing (AUT) of Pipeline Girth Welds. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague 2014, October 6-11 (ECNDT 2014), pp. 1-15, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=16600>.

A FAJLAGOS TÖRÉSI MUNKA ÉS A BEMETSZÉS KINYÍLÁS VIZSGÁLATA S960QL ACÉL ELŐMELEGÍTÉS NÉLKÜL ÉS 150°C-OS ELŐMELEGÍTÉSI HŐMÉRSÉKLETEN HEGESZTETT KÖTÉSEIN

EXAMINATION OF ABSORBED SPECIFIC FRACTURE ENERGY AND NOTCH OPENING DISPLACEMENT ON S960QL STEEL WELDED JOINTS WITHOUT PREHEATING AND WITH 150°C PREHEATING TEMPERATURE

Sas Illés

Elektro-MontőrlING Kft.

5100 Jászberény Monostori út 22.

sas@elektromontoring.hu

Lukács János

Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet,
Miskolci Egyetem

3515 Miskolc-Egyetemváros

janos.lukacs@uni-miskolc.hu

A nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiájának egyik fontos paramétere az előmelegítési hőmérséklet. Az előmelegítés jelentős befolyással van a nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseinek mechanikai tulajdonságaira, valamint kedvező hatással van a hidegrepedés elkerülésére és a hegesztést követő maradó feszültségekre. A kísérletek során S960QL anyagminőségű nagyszilárdságú acélok előmelegítés nélkül és 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten hegesztett kötések bemetszés kinyílását (NOD) és a fajlagos törési munka (W_c) értékét hasonlítottuk össze.

Preheating temperature is one of important parameters of welding technology of high strength steels. Preheating has a significant influence on the mechanical properties of high strength steel welding joints, for an avoidance of cold cracking and for the residual stress field of the welded joint. During our experiments, S960QL high strength steel welded joints without preheating and with 150°C preheating temperature were compared using notch opening displacement (NOD) and absorbed specific fracture energy (W_c) values.

1. Bevezetés

Napjainkban a nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett acélszerkezetek gyártása során kiemelt figyelmet kap a *biztonság* – ahol a gyártási és üzemelési szempontokat egyaránt figyelembe kell venni – és a *gazdaságosság* – mely a felhasznált nagyszilárdságú acélok tulajdonságainak hatékony kihasználásával és a gyártási költségáfordítás csökkentésével jelentősen befolyásolható.

A nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett termékek pl. mobil daruk, szállító anyagmozgató berendezések, bányaiipari eszközök esetében könnyen belátható hogy a hegesztéstechnológiának meghatározó szerepe van mind a biztonságos mind a gazdaságos hegesztett szerkezet gyártásában. A hegesztéstechnológia egyik meghatározó paramétere az előmelegítési hőmérséklet (T_P) mely jelentős befolyással bír a nagyszilárdságú hegesztett kötések mechanikai tulajdonságaira, valamint kedvező hatással van a hidegrepedés elkerülésére és a hegesztést követő maradó feszültségekre, ezáltal a hegesztett szerkezetek biztonságára és – a nagyszilárdságú acélok tulajdonságainak hatékony kihasználásán keresztül – a gazdaságosságra is. Az előmelegítési hőmérséklet - tekintettel idő és energiaszükségletére – szintén befolyással van a hegesztett szerkezet gyártási költségáfordítására is.

A cikk első részében a nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológia tervezés sajátosságai kerülnek bemutatásra majd az XABO960-as S960QL szilárdsági csoportba tartozó nemesített nagyszilárdságú acél előmelegítés nélkül és 150°C-os előmelegítési hőmérséklettel készült hegesztett kötéseinek eljárás vizsgálati, bemetszés kinyílás (NOD) és fajlagos törési munka (W_c) vizsgálatának eredményei kerülnek összehasonlításra.

2. Nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológia tervezési sajátosságai

A nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológia tervezésnél fontos szempont hogy a Graville diagram alapján a nemesített nagyszilárdságú acélok (S690Q, S960Q) hegesztéséhez a hidegrepedések miatt előmelegítés, a túlzott mértékű kilágyulás és a szívósságsökkenés miatt pedig szabályozott vonalenergiájú technológia szükséges. [1]

2.1 Hidegrepedés elkerülése nagyszilárdságú acélok esetén

A nagyszilárdságú acélok jellemző hegesztéstechnológiai problémája a hidegrepedés a fokozott hidegrepedési hajlam miatt így a technológia meghatározásának egyik célja a hidegrepedési kockázat csökkentése melyet a megfelelő előmelegítési hőmérséklet megválasztásával tudjuk befolyásolni.

Az előmelegítési hőmérséklet (T_P) függ a CET szénegyenértéktől (az alapanyag vegyi összetételétől), a d hegesztett kötésben résztvevő lemezek vastagságától, a HD varrat hidrogéntartalmától és a Q hőbeviteltől [2]:

$$T_P = f(CET, d, HD, Q) \quad (1)$$

Fontos kiemelni hogy többretegű varratok esetében a meghatározott előmelegítési hőmérséklet egyben minimális rétegek közötti hőmérséklet is. [2]

Az előmelegítést hagyományosan hevítő lánggal vagy elektromos melegítő paplannal is végezhetjük. Az elektromos melegítő paplanok fő előnye a lánggal történő előmelegítéssel szemben hogy egyenletesen hevítik fel a varratot a teljes varrathossz mentén és az előmelegítés – a paplanok felhelyezését követően – nem igényel felügyeletet, így az előmelegítés ideje alatt a hegesztő másik terméken tud munkát végezni. További előnye hogy a beállított előmelegítési hőmérsékletet – amennyiben a melegítő paplant úgy helyeztük el hogy hegesztés során végig a munkadarabon maradhat – a hegesztés során folyamatosan tartja illetve szükségesség esetén a hegesztést követő hidrogén csökkentő hőkezelés a hegesztést követően azonnal indítható. Hátránya hogy a felhelyezés időszükségletét és az alkalmazhatóságát jelentősen befolyásolja a szerkezet kialakítása.

Fontos hogy nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett szerkezetek esetében a hidegrepedési kockázatának csökkentése érdekében törekedni kell a hegesztés okozta belső feszültségek és alakváltozások minimalizálására. Ezt megfelelően kialakított hegesztési sorrend segítségével tudjuk biztosítani. Bonyolult merev hegesztett szerkezetek többretegű varratinál javasolt hogy a teljes varratkeresztmetszet feltöltése ne egy lépésben valósuljon meg hanem folyamatosan építsük fel a varratokat a takaró sorokig.

A hegesztést követően vastagabb lemezek tompavarratainál javasolt hidrogéncsökkentő hőkezelés alkalmazása melyet közvetlenül a hegesztés után „egy meleggel” kell elkezdni. A hidrogéncsökkentő hőkezelést 200-250°C közötti hőmérséklet tartományban, 1 órás hőntartás mellett javasolt elvégezni majd a hőkezelést követően a varratot a hirtelen lehűlés megakadályozása érdekében termopaplan kell betakarni. A hidrogéncsökkentő hőkezelés folyamatának leírása alapján belátható, hogy az előbbieken említett elektromos melegítőpaplanok alkalmazása számos előnyt biztosít a hőkezelés végrehajtásához. [3]

2.2 Hőhatásövezet szívóssága és keménysége nagyszilárdságú acélok esetén

A nagyszilárdságú acélok másik jellemző hegesztéstechnológiai problémája, hogy a hőhatásövezet szívósságának és keménységének biztosítása érdekében a hőbevitel korlátoznunk kell. A szívóssági és a keménységi tulajdonságokat a hegesztési hőciklus $t_{8/5}$ 800°C-ról 500°C-ra hűlési ideje befolyásolja. Szakirodalmi ajánlások alapján S960QL szilárdsági csoportba tartozó alapanyagok esetében a $t_{8/5}$ hűlési idő 5 – 15 s közötti tartományba tartása esetén a hegesztett kötés szívóssági és keménységi tulajdonságai megfelelők maradnak.[3]

A hegesztéstechnológia paramétereinek U - feszültség, I – áramerősség és v_{heg} - hegesztési sebesség valamint a T_P előmelegítési hőmérséklet meghatározása során olyan paramétereket kell választani amellyel a kiválasztott hegesztési eljárás és a kötéskialakítás mellett a $t_{8/5}$ hűlési idő 5 - 15 s tartományban tudjuk tartani.

Gyakorlati tapasztalatok alapján nagyszilárdságú acélok esetében – mivel a fent megadott intervallum egy elég szűk hegesztési paraméter ablakot eredményez – a hegesztés során tilos a varrat lengetése, többretegű varrat esetén sorolt varratkialakítás mellett ügyelni kell a közbeni hőmérsékletre (250°C) is, mivel fennáll a kötés túlhevülésének kockázata, mely a $t_{8/5}$ hűlési idő megnövekedését eredményezi ezáltal romlik a kötés szívóssági tulajdonsága.

Üzemi gyakorlatban szerzett tapasztalatok és gyártói ajánlások alapján a fenti 5 -15 s-os hűlési idő tartása érdekében a hegesztés során törekedni kell hogy a varrat szélessége 10-15 mm-es tartományon belül maradjon melyet egy egyszerű üzemi körülmények között is alkalmazható „1Ft-os, 1 Centes” szabályként fogalmazhatunk meg. Ez alapján a varrat szélessége ne legyen szélesebb mint a már forgalomból kivont 1 Ft-os vagy 1 € Cent-es érme átmérője.

Nagyszilárdságú acélok esetében fontos kiemelni, hogy a szívósság csökkenésének kockázata gyártási szempontból magasabbra értékelhető mint a hidegrepedés kockázata. Ugyanis a hidegrepedések bár késleltetett módon de mágneses repedésvizsgálattal akár vizuálisan is viszonylag jól észlelhetők azonban a szívósság csökkenés a gyakorlatban alkalmazott roncsolásmentes vizsgálatokkal nem észlelhető. Tekintve hogy ezen acélok nyúlása igen alacsony ezért tönkremenetelt megelőzően az alakváltozás nem jelentős ezért kritikus a szívósság csökkenése. A fentiek alapján a hegesztési folyamat felügyelete kiemelten fontos ezen acélok hegesztése esetén.

3. Hegesztési kísérletek S960QL acélon előmelegítés nélkül és 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten

3.1 Hegesztési kísérlet leírása

Kísérleti hegesztést végeztünk a Thyssen Stahl AG által gyártott XABO 960-as S960QL szilárdsági csoportba tartozó nemesített nagyszilárdságú acélon. A kísérleti hegesztéshez 15 mm vastagságú 150x600 mm-es próbalemezeket használtunk fel.

Az alapanyag vegyi összetétele az 1. táblázatban és a mechanikai tulajdonságai a 2. táblázatban láthatóak (a feltüntetett adatok az alapanyag EN 10204 3.1- szerinti bizonylat alapján kerültek megadásra)

Adagszám	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V
626906	0,17	0,28	0,7	0,01	0,001	0,031	0,62	0,37	1,69	0,05

1. táblázat
XABO 960 alapanyag vegyi összetétele %-ban műbizonylat alapján

Adagszám	R _{EH}	R _M	A	Ütőmunka KV [J]			
	[MPa]	[MPa]	[%]	Vizsgálati hőmérséklet	1	2	3
626906	1003	1077	15	-40°C	29	27	31
				-60°C	22	20	19

2. táblázat
XABO 960 alapanyag mechanikai tulajdonságai műbizonylat alapján

A hegesztési kísérlethez a próbadarabok 600 mm hosszú élét teljes keresztmetszetű tompavarratos (BW) kötés kialakításhoz forgácsolással készítettük elő. A hegesztést vízszintes PA pozícióban végeztük MSZ EN ISO 4063 szerinti 135-ös eljárással, Thyssen Ø1,2 mm UNION X96 matching tömör huzalelektrodával, M21-es 82/18 Ar-CO₂ kevert védőgázzal.

Az alapanyag vegyi összetétele, a kötéskialakítás és a választott technológia alapján az előmelegítési hőmérsékletre számított értékeként $T_P = 106^\circ\text{C}$ -t kaptam. A kalkulált előmelegítési hőmérsékletet a gyártó ajánlások alapján 150°C-ra megemeltem.

Két kísérleti próbadarabot hegesztettünk le a fent megadott módon a 1. próbadarabot a meghatározott 150°C-os előmelegítési a 2. próbadarabot előmelegítés nélkül készítettük el. Ki kell emelnem, hogy az előmelegítés nélkül hegesztett darab esetében minden sornál megvártuk amíg visszahűl a próbadarab 50°C-alá így biztosítottuk hogy minden sor esetében a hegesztést előmelegítés nélkül végezzük.

A hegesztési paramétereket és a varratfelépítést a 3. táblázat szemlélteti.

Sorok	I	U	v _{huz}	v _{heg}	Q
	[A]	[V]	[m/min]	[mm/s]	[kJ/mm]
1	100-120	21-22	3,1-3,5	3,6-4,1	0,49-0,54
2-5	240-275	29-31	10	9,2-13,0	0,49-0,72
6-10	275-280	30-31	10	7,7-9,7	0,72-0,93



3. táblázat
Hegesztési kísérletek paraméterei és varratfelépítése

3.2 Eljárásvizsgálati eredmények

Mindkét hegesztési próbatesten elvégeztük a hegesztéstechnológia jóváhagyásához előírt szabványos eljárásvizsgálatot. Az eljárásvizsgálat során az előírt roncsolásos anyagvizsgálatok közül a korona és gyök oldali hajlító vizsgálatok esetében a vizsgálatot a szabvány által előírt helyett jelentősen kisebb átmérőjű nyomótüskével és támasztóhengerrel végeztük a repedés megjelenéséig, a vizsgálatokat értékelésekor meghatároztuk a hajlítás során történő alakváltozást (nyúlást) és az alakváltozást elszenvedő zóna mértékét. A eredmények értékelésekor összehasonlítottuk az alapanyag bizonylatolt nyúlását és próbatest alakváltozását.

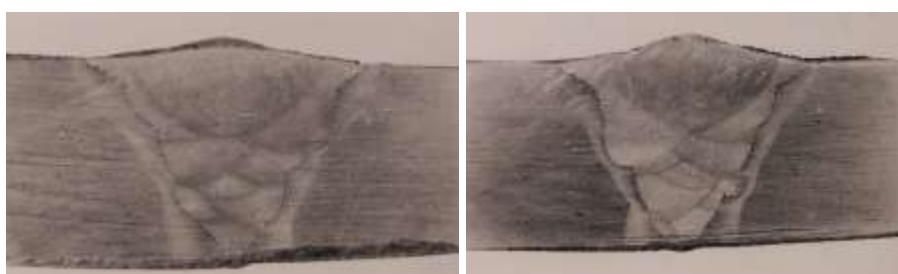
Az eljárásvizsgálat eredményeit a 4. táblázatban láthatjuk.

Eljárás vizsgálatok	1. próbadarab 150°C előmelegítés	2. próbadarab előmelegítés nélkül
Szemrevételezés VT	Megfelelt	Megfelelt
Mágneses repedésvizsgálat MT	Megfelelt	Megfelelt
Ultrahangos vizsgálat UT	Megfelelt	Megfelelt
Szakítóvizsgálat R _M [MPa]	1013-1047	1011-1037
Hajlító vizsgálat Nyúlás [%]	38,2-38,4	38,1-38,3
Ütővizsgálat – hőhatásövezet KV [J] -40°C-on	63 (51-79)	54 (46-60)
Ütővizsgálat – varratfém KV [J] -40°C-on	51 (45-57)	48 (45-53)
Keményésvizsgálat HV10	383-464	383-421
* nem szabványos vizsgálat alapján		

4. táblázat
Eljárásvizsgálati eredmények

Az eljárásvizsgálat roncsolásmentes vizsgálatai mindkét próbatest esetében megfelelő eredménnyel zárultak. A szakítóvizsgálatok esetében az eredményeket összevetve az alapanyag 1077 MPa-os szilárdságával megállapítható hogy a kötés szakítószilárdsága ugyan nem éri el az alapanyag szakítószilárdságát azonban a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten és az előmelegítés nélkül hegesztett próbadarab eredményei között érdemi eltérést nem észleltünk. A hajlítóvizsgálat eredményeit összehasonlítva hasonlóan megállapítható hogy a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten és az előmelegítés nélkül hegesztett próbadarab eredményei között érdemi eltérést nem észleltünk, az előzőekben leírtak szerint meghatározott nyúlás azonban lényegesen magasabb értéket eredményezett mint az alapanyag bizonylatolt 15%-os nyúlása. Az ütővizsgálat eredményi mindkét esetben meghaladták -40°C-on előírt 27J követelményt és jelentősebb eltérést itt sem észleltünk a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten és az előmelegítés nélkül hegesztett próbadarab eredményei között. A keményésvizsgálat eredményeit tekintve a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten hegesztett darab esetében egy magasabb 464 HV10 értéket mértünk a többi eredmény vonatkozásában itt is hasonló megállapításra jutottunk hogy a két próbatest eredményei között szignifikáns eltérést nem észleltünk.

A próbatestekről készült makrofelvételeket az 1. az alapanyagról és a próbatestek hőhatásövezeteiről készült mikrofelveleket pedig a 2. ábrán láthatjuk.



1. Próbatest 150°C előmelegítés
2. Próbatest előmelegítés nélkül

1. ábra
Makrofelvételek



2. ábra
Alapanyag mikrofélvétel N=200x



3. ábra

1. próbatest 150°C előmelegítés HAZ mikrofelvétel N=200x



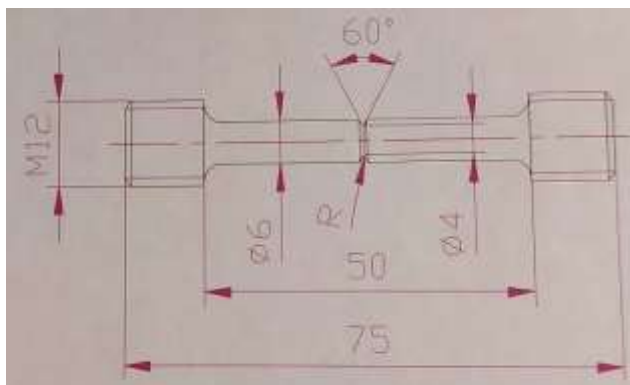
4. ábra

2. próbatest előmelegítés nélkül HAZ mikrofelvétel N=200x

3.3 Bemetszés kinyílás (NOD) és fajlagos törési munka (W_C) vizsgálati eredmények

Mindkét hegesztési próbatesten elvégeztük a bemetszés kinyílás vizsgálatát és a Czoboly-Radon extrapolációs módszerrel meghatároztuk repedés kinyílás értékét (COD). A fajlagos törési munkát ugyanezen próbatestek vizsgálati eredményei alapján határoztuk meg.

A vizsgálathoz az 5. ábrán látható szakító próbatesteket munkáltunk ki az alapanyagból, a 150°C előmelegítési hőmérsékleten és az előmelegítés nélkül hegesztett kötésekből. Mind a három mintavételi helyről 4 előre meghatározott lekerekítési rádiusszal R 3-3 próbatestet készítettünk elő így összesen $3 \times 3 \times 3$ azaz 36 próbatest szakítóvizsgálatát végeztük el -40°C-on. A próbatesteken látható bemetszésként $R = \infty$; 1; 0,2; 0,1 mm-es lekerekítési rádiust határoztunk meg. A próbatestek kimunkálása során a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten hegesztett próbadarabból kimunkált szakítópróbatestek esetében az 1 mm helyett 0,5 mm-es rádiusz illetve 1 szakítópróbatest 0,2 mm rádiusz helyett 0,3 mm rádiusz került kialakításra. Az $R = \infty$ lekerekítési rádiusz esetében a próbatest vizsgálat hossz közepű harmadában $\varnothing 4$ mm-re leesztergáltuk a próbatestet.



5. ábra

Szakító próbatest bemetszéssel

Bemetszés kinyílás (NOD) vizsgálata

A bemetszés kinyílás vizsgálat során a szakítás előtt a profilprojektor segítségével felvettük a bemetszés eredeti kontúráját majd a szakítás után a szakító próbatesteket összeillesztve profilprojektor segítségével az eredeti profilra felrajzolva meghatároztuk a bemetszés kinyílás (NOD) értékét. A vizsgálat eredményei az 5. táblázatban kerültek összefoglalásra.

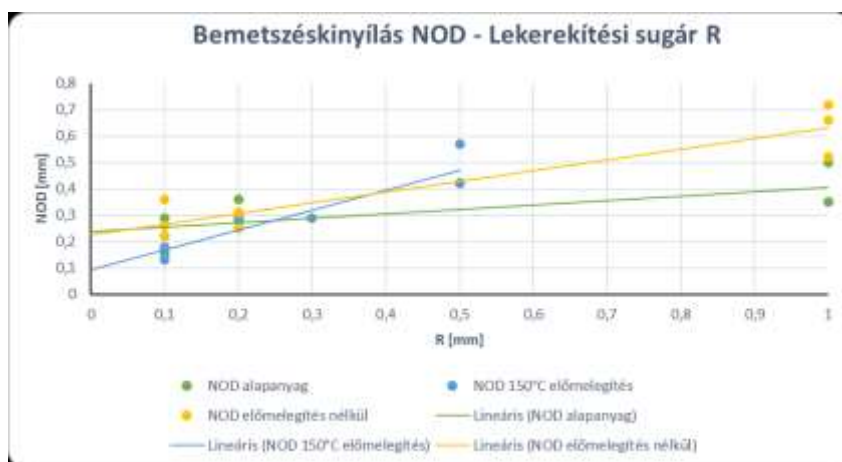
Lekerekítés rádiusza R [mm]	NOD Alapanyag [mm]	NOD 1. próbatest 150°C előmelegítés [mm]	NOD 2. próbatest Előmelegítés nélkül [mm]
1	0,35 0,5 0,35	-	0,72 0,66 0,52
0,5	-	0,57 0,42 0,42	-
0,3	-	0,29	-
0,2	0,29 0,28 0,36	0,25 0,28	0,25 0,31 0,31
0,1	0,29 0,22 0,15	0,18 0,17 0,13	0,22 0,36 0,26

5. táblázat
Bemetszés kinyílás(NOD) vizsgálati eredmények

A bemetszés kinyílás értékét ábrázolva a lekerekítési sugár függvényében egy-egy lineáris regressziós egyenes fektethető az alapanyag, a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten és az előmelegítés nélkül hegesztett próbadarabból kimunkált próbatestetek vizsgálati eredményeire. A regressziós egyenes y tengely metszéspontjában leolvasható az $R=0$ repedéshez tartozó repedés kinyílás (COD) értéke.[4]

$$\text{NOD} = m \cdot R + \text{COD} \quad (2)$$

Az 6. ábrán ábrázoltuk a bemetszés kinyílás vizsgálati eredményeit a 6. táblázatban pedig a lineáris regressziós egyenes alapján meghatározott repedés kinyílás (COD) értékek kerültek összehasonlításra



6. ábra
Bemetszés kinyílás (COD) a lekerekítési sugár függvényében

Mintavétel helye	COD [mm]
Alapanyag	0,2379
1. próbatest 150°C előmelegítés	0,0911
2. próbatest előmelegítés nélkül	0,2249

6. táblázat
Repedés kinyílás (COD) értékek összehasonlítása

Fajlagos törési munka (W_c) vizsgálata

A fajlagos törési munkát a 36 próbatest szakítása során rögzített erő-elmozdulás diagrammokról kiolvasott F_M és F_u értékek és a próbatestek kiinduló d_0 és szakítás után lemerő d_u átmérője alapján határoztuk meg az alábbi összefüggés szerint [4]:

$$W_c = [(R_m + R'_u)/2] * [2 * \ln(d_0/d_u)] \quad (3)$$

A feszültséggyűjtési tényezőt (K_t) a próbatest kiinduló geometriájának – a próbatest kiinduló átmérője D , a beszúrás átmérője d_0 és a lekerekítési rádiusz R – függvényében nomogramból olvastam ki [4].

$$K_t = f(D/d_0, R) \quad (4)$$

A 7. táblázatban a lekerekítési rádiusz, a feszültséggyűjtési tényező függvényében kerültek megadásra az alapanyagra a 150°C előmelegítési hőmérsékleten és az előmelegítés nélkül próbatestek vizsgálati eredményei, a 8 táblázatban pedig a lekerekítési rádiusz és a feszültséggyűjtési tényező függvényében a fajlagos törési munka vizsgálati eredményeinek (W_c) átlag és átlag eltérés értékei kerültek megadásra.

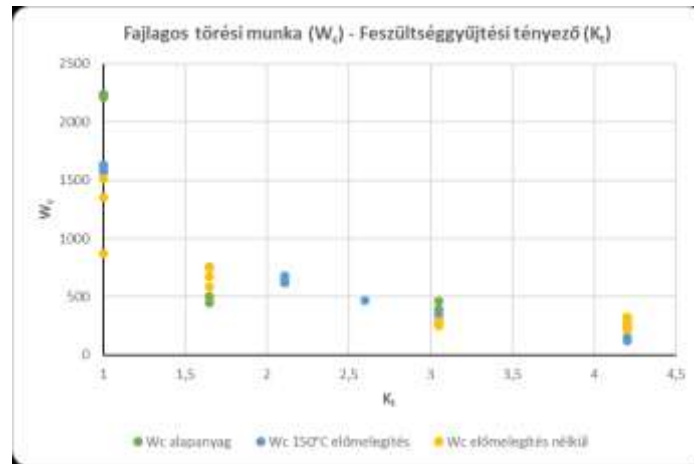
Lekerekítés rádiusza R [mm]	Feszültséggyűjtési tényező K_t [-]	W_c Alapanyag [J/cm ³]	W_c 1. próbatest 150°C előmelegítés [J/cm ³]	W_c 2. próbatest Előmelegítés nélkül [J/cm ³]
∞	1	2210 2243 2232	1598 1573 1636	871 1513 1352
1	1,65	505 753 450	-	673 747 586
0,5	2,11	-	681 621 636	-
0,3	2,6	-	467	-
0,2	3,05	462 396 338	281 346	293 253 281
0,1	4,2	319 319 241	158 246 124	269 216 325

7. táblázat
Fajlagos törési munka (W_c) vizsgálati eredmények

R [mm]	K_t [-]	W_c átlag [J/cm ³]	W_c átlag eltérés [J/cm ³]
∞	1	1692	357,5
1	1,65	619	105,5
0,5	2,11	646	23,2
0,3	2,6	467	0
0,2	3,05	331	54,3
0,1	4,2	246	55

8. táblázat
Fajlagos törési munka (W_c) átlag és átlag eltérés a feszültséggyűjtési tényező (K_t) függvényében

A fajlagos törési munkát a feszültséggyűjtési tényező függvényében ábrázoltam 7. ábrán az alapanyagra, a 150°C előmelegítési hőmérsékleten és előmelegítés nélkül hegesztett próbadarabokra vonatkozóan.



7. ábra

Fajlagos törési munka (W_t) a feszültséggyűjtési tényező (K_t) függvényében

3. Kísérleti eredmények összefoglalása

Összehasonlítva a két kísérleti hegesztés hagyományos eljárásvizsgálati és bemetszés kinyílási és fajlagos törési munka vizsgálat eredményeit az alábbi megállapítások tettük:

- A próbahegesztések eljárásvizsgálata alapján megállapítható hogy az előmelegítés nélkül és a 150°C előmelegítési hőmérsékleten hegesztett kötések eredményei szignifikánsan nem tértek el.
- A bemetszés kinyílás vizsgálat alapján meghatározott COD értékek közül a 150°C előmelegítési hőmérsékleten hegesztett kötés eredményei a legalacsonyabbak – azonban figyelembe kell venni hogy a vizsgálatok nem azonos kialakítású próbatesteken történtek
- Az előmelegítés nélkül hegesztett kötés és az alapanyag COD értékei nem mutatnak jelentős eltérést.
- Az alapanyagra fektetett regressziós egyenes meredeksége kisebb mint az előmelegítés nélkül és a 150°C-os előmelegítési hőmérsékleten készült próbatestek vizsgálati eredményei
- A fajlagos törésmunka vizsgálat alapján megállapítható hogy – az $R=1$ mm lekerekítést kivéve – a hegesztett kötések fajlagos törésmunka átlagos értékei alacsonyabbak voltak az alapanyagénál
- az alapanyagból mind a 150°C előmelegített mind az előmelegítés nélkül hegesztett kötésből kimunkált próbatestek eredményei élesebb bemetszések esetén alacsonyabb szórást mutatnak mint a sima próbatestek esetén

A vizsgálati eredmények alapján egyértelműen nem igazolható hogy az előmelegítés elhagyása jelentősen rontotta volna a hegesztett kötés mechanikai és törési tulajdonságait és hidegrepedéseket sem észleltünk a vizsgálatok során, azonban figyelembe kell venni hogy a kísérleteket alakváltozásában nem gátolt próbadarabokon végeztük. Komplex alakváltozásában gátolt hegesztett szerkezetek esetében ahol jelentős belső feszültségek ébrednek a gyakorlati tapasztalatok azt mutatja hogy a nem megfelelő előmelegítés miatt hidegrepedések jelennek meg ezért az előmelegítés nem hagyható el.

Fenti gondolatok alapján azonban egyszerű alakváltozásban nem gátolt hegesztett szerkezetek esetében gazdaságossági szempontok alapján érdemes nagyszilárdságú acélok előmelegítés nélküli hegesztéstechnológiájának további vizsgálata.

Irodalomjegyzék

- [1] Gáspár M - Balogh A: S960Q vs S355N: Hogyan befolyásolják a hegesztési paraméterek a hőhatásövezet tulajdonságait nagy és normálszilárdságú szerkezeti acéloknál? Miskolc
- [2] MSZ EN 1011-2 Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 2: Arc welding of ferritic steels
- [3] Thyssen Krupp, Recommendation for welding of XABO 890 and XABO 960 Edition 09/2004
- [4] Czoboly E – Havas I: Fémek törése és fáradása BME MTAI 18. sz. füzet

HEGESZTETT SZERKEZETEK MÉRÉSI LEHETŐSÉGEI FARO VANTAGEE LASER TRACKER ÉS FARO FOCUS S70 LASER SCANNER MÉRŐRENDSZEREKKEL

MEASUREMENT POSSIBILITIES OF WELDED STRUCTURES WITH FARO VANTAGE^E LASER TRACKER AND FARO FOCUS S70 LASER SCANNER

Sas Illés

Elektro-MontőrlNG Kft.

5100 Jászberény Monostori út 22.

sas@elektromontoring.hu

Gábrriel Miklós

SIDEX Trade Kft.

1224 Budapest Dózsa György út 105.

faro3@sidex.hu

Hegesztett acélszerkezetek mérése és ellenőrzése során a hagyományos mérési módszerek alkalmazása esetén számos problémával szembesülünk. A modern mérőrendszerek alkalmazása - akár érintéses, akár érintésmentes mérési elveken alapulnak - azonban olyan lehetőséget adnak a mérés és ellenőrzés területén, mellyel a gyártás hatékonysága jelentősen javítható. Az egyik lehetőség, hogy teljes képet kaphatunk a hegesztés előtti és utáni állapot összehasonlításával a hegesztési deformációk mértékéről, melynek segítségével a hegesztési sorrend és annak hatása komplex szerkezeteken is vizsgálható.

We must deal with many problems during measuring and controlling of welded structures with conventional measuring methods. However, usage of modern measurement systems - based on either contact or non-contact measuring methods - give us great opportunities in the measuring and controlling processes, so the efficiency of the production could be significantly improved. One of these opportunities is getting a complete picture of the steel structures' deformations before and after the welding because with this information the welding order and its influence in complex welded structures can be analysed.

1. Bevezetés

A hegesztett nehéz acélszerkezetek mérési lehetőségei az elmúlt évtizedben jelentős fejlődésen mentek keresztül. Napjainkban a hagyományos mérőeszközök (pl.: mérőszalag, teodolit, lézeres távolságmérő és szintező eszközök) mellett lehetőségünk van komplex mérőrendszerek alkalmazására is, amelyekkel egyre hatékonyabban és egyre pontosabban tudjuk elvégezni a hegesztett nehéz acélszerkezetek bemérését. Ezen rendszerek lehetőséget nyújtanak a 3D testmodellek és a mért eredmények összevetésére, valamint a mérési pontok/helyek számának akár jelentős megnövelésére is. A cikkünkben a FARO Vantage Laser Tracker és a FARO Focus Laser Scanner mérőrendszerek lehetőségeit szeretnénk bemutatni, melyet az Elektro-MontőrlING Kft.-ben a hegesztett nehéz acélszerkezetek mérési tapasztalatai alapján állítottunk össze.

2. Hegesztett szerkezetek mérési problémái

Mielőtt rátérnénk ezen rendszerek és lehetőségeinek bemutatására először is vizsgáljuk meg, hogy milyen problémákkal szembesülünk a hegesztett nehéz acélszerkezetek hagyományos mérőeszközökkel történő bemérése során. A teljesség igénye nélkül az alábbi - gyakorlati tapasztalataink alapján legjellemzőbb - mérési problémákat szeretnénk áttekinteni:

- Mérőeszközök hibája,
- Közvetett mérések hibája,
- Mérési módszer bizonytalansága,
- Mérési/ellenőrzési pontok számossága és az időráfordítás,
- Mérési eredmények összehasonlítása,
- Mérés dokumentálása.

2.1 Mérőeszközök hibája

A hagyományos mérőeszközök hibája alapvetően a mérőeszköz eredeti hibájából és a mérőeszköz használata során keletkező (pl.: kopás, nyúlás) hibákból tevődik össze. Napjainkban még mindig a legelterjedtebb mérőeszköz hegesztett nehéz acélszerkezetek mérése és ellenőrzése során a mérőszalag. Gyakorlati tapasztalataink alapján a mérőszalagokat a felhasználás megkezdése előtt érdemes etalonnal összehasonlítani, mert nagyobb méretek esetén akár 2-3 mm eltérést is észleltünk új mérőszalagok esetében is. Ezen mérőeszközök másik jelentős hibája az elhasználódásukból fakad, hiszen a szalag kopása miatt a mérőskála leolvashatatlaná válhat, illetve a használat során az ismétlődő kifeszítések során megnyúlhat a mérőszalag. A lézeres távolságmérők alkalmazása például a használat során megjelenő problémák kiküszöbölésére jó megoldás, azonban ezen eszközöknél is figyelembe kell venni az eredeti mérési hibát, melyet jellemzően ezen mérőeszközök esetében a mért távolság függvényében adnak meg.

2.2 Közvetett mérések hibája

Bonyolult hegesztett szerkezetek mérése esetén számos alkalommal előfordul, hogy a gyártási rajzon megadott méret közvetlenül nem mérhető. Ebben az esetben vagy valamilyen módszerrel ki kell vetítenünk a mérendő méretet (pl. derékszög vagy élvonalzó alkalmazásával), vagy egy méretlánc felépítésével, közvetlenül mérhető méretek segítségével számítható ki, ellenőrizhető le a rajzon megadott méret és tűrés. Ezekben az esetekben könnyen belátható, hogy a mérési eredmény jelentősen függ a kivetítés módszerétől és pontosságától vagy az összeállított méretlánctól. Ez utóbbi esetében ki kell emelnünk, hogy az összeállított méretlánc minden mért elemének van mérési hibája, mely a mérés során összeadódik. Belátható, hogy amennyiben a méretláncot sok elemből építjük fel, akkor a mérésünk igen pontatlanná válhat.

2.3 Mérési módszer bizonytalansága

A kiválasztott mérőeszköz és a mérés módjának pontatlansága adja együtt a mérési módszer bizonytalanságát. Jellemző példa hegesztett nehéz acélszerkezetek mérése esetében, hogy egy ellenőrzött méret többszöri mérése esetén ugyanazon eszköz és mérési mód alkalmazása mellett jelentősen eltérő eredményeket kapunk. Ebben az esetben ki kell értékelnünk a mérési módszer bizonytalanságát, a mért értékek szórását és a mérendő méret tűréstartományát összehasonlítva dönthetjük el, hogy az alkalmazott mérési módszer megfelelő-e. Hegesztett nehéz acélszerkezetek esetében a mérőszalaggal, derékszöggel/élvonalzóval történő kivetítés során jellemzően előfordul, hogy a rajzi vagy szabvány szerint előírt tűréstartomány és a mérési eredményeink szórása szinte azonos. Ezekben az esetekben új mérési módszert kell választani.

2.4 Mérési/ellenőrzési pontok számossága és az időráfordítás

Hegesztett nehéz acélszerkezetek esetén a mérési/ellenőrzési pontok számosságának meghatározása egy optimalizálási folyamat eredménye. A minőség szempontjából a mérési/ellenőrzési pontok számosságának növelése magasabb biztonságot eredményez, azonban ezzel arányosan nő a mérési/ellenőrzési időráfordítás és ezáltal nő a termék előállítására fordított költség is. Hagyományos mérési módszerek esetében jellemzően a termék funkciójának vagy a gyártási szempontok alapján kritikusnak ítélt méretek mérésére és ellenőrzésére kerül csak sor. Esetenként a deformációk ellenőrzésére néhány kontrol méret ellenőrzése kerül beépítésre a gyártási folyamatba. Könnyen belátható, hogy ezen mérési/ellenőrzési pontok száma bonyolult szerkezetek esetében igen korlátozott számú. Egyszerűbb acélszerkezetek esetében a mérés/ellenőrzés kiváltásaként beállító sablont/készüléket alkalmaznak, azonban bonyolult, hegesztett nehéz acélszerkezetek esetében ezen sablonok jelentős méretük, tömegük és alkalmazhatósági problémáik miatt nem terjedtek el.

2.5 Mérési eredmények összehasonlítása

Tekintettel arra, hogy hegesztett nehéz acélszerkezetek hagyományos mérőeszközökkel történő mérése esetén korlátozott számú mérési eredmény áll rendelkezésünkre, ezért a mérési eredmények kiértékelése során jellemzően a mért és az előírt értékek összevetésére kerül sor. A gyártás különböző fázisaiban végzett mérések/ellenőrzések összehasonlítására (pl. összeállítás, hegesztés, egyengetés utáni állapotok) hagyományos mérőeszközökkel történő mérések/ellenőrzések esetében csak korlátozott számban van lehetőségünk. Gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy ilyen jellegű elemzés jellemzően a problémák felmerülése esetén történik. Sajnos ezen esetek jelentős részében a rendelkezésünkre álló mérési eredmények nem elegendőek a probléma részletes elemzésére, így a következő, azonos termék gyártása során lehet a probléma kivizsgálását folytatni. Jellemző, hogy ezen hegesztett nehéz acélszerkezetek esetében két termék gyártása között akár jelentős idő telhet el, így ezen probléma kivizsgálása hetekben vagy akár hónapokban is mérhető.

2.6 Mérés dokumentálása

A mérési folyamat lezárása a mérési eredmények dokumentálása. Hegesztett nehéz acélszerkezetek esetében nem csak a hagyományos mérőeszközökkel történő méréshez, hanem esetenként a mérési eredmények dokumentálásához is több személy kell. Gondoljunk olyan esetekre, amikor a mérést végző személy a terméken végzi a mérést és kollégája a mért értékeket rögzíti a jegyzőkönyvbe. A mérési eredmények rögzítése sem minden esetben teljes körű, hiszen nem minden mért érték kerül rögzítésre, jellemzően egy mért érték vagy több mérésből származó minimum és maximum értékek kerülnek rögzítésre. Ez utóbbi esetben a mérési pontok számára és eloszlására vonatkozó adat nem áll rendelkezésünkre. Jellemző továbbá, hogy amennyiben a mérés kiértékelése során bizonytalanságot érzünk, meg kell ismételni a mérést, mely jelentős többlet időráfordítást eredményez, valamint a termék gyártási-átfutási idejét is jelentősen megnöveli, hiszen ezen idő alatt egyéb tevékenység nem végezhető a terméken.

2.7 Mérés problémák összefoglalása

A hegesztett nehéz acélszerkezetek hagyományos mérési módszereinek problémáit áttekintve megállapíthatjuk, hogy számos olyan problémába ütközünk, melyek negatívan befolyásolják mind a mérésünk pontosságát, mind annak megbízhatóságát, illetve jelentős időráfordítást mellett is csak korlátozott számú információ fog a rendelkezésünkre állni. További problémaként említhető meg, hogy a mérési eredmények kiértékelése, összehasonlítása és dokumentálása is számos korlátba ütközik. A modern mérőrendszerek alkalmazásának célja, hogy ezen problémákra megoldást találjunk. A továbbiakban azt fogjuk áttekinteni, hogy ezen modern mérőrendszerek milyen megoldást/lehetőséget nyújtanak a fenti problémák kezelésére.

3. A mérőrendszer bemutatása

3.1 FARO Vantage Laser Tracker

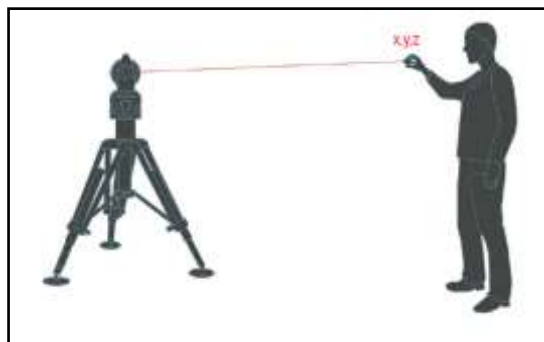
A FARO Vantage Laser Tracker kiválóan alkalmas olyan területeken, ahol rendszeresen nagyméretű, komplex alkatrészek mérését kell pontosan és rövid idő alatt megvalósítani. A Laser Tracker általánosan elterjedt megoldásnak számít a repülőgépiparban és az autógyártásban, de egyre nagyobb teret hódít a gépgyártástechnológia és az építőipar legkülönbözőbb területein egyaránt.



1.ábra

A tapintógömb (SMR – Spherically Mounted Retroreflector) [1]

A Laser Tracker egy nagy mérési tartományú (0 - 35m, bizonyos modelleknél akár 80m hatósugár), hordozható koordináta mérőgép, amelynek működési elve rendkívül egyszerű. A pontfelvétel eszköze az 1. számú ábrán látható tapintógömb, amelyet a mérést végző személy mozgat a műszer munkaterében. Az üreges tapintógömbben három egymásnak fordított tükör helyezkedik el. A három egymással kölcsönösen merőleges tükör által meghatározott metszéspont a gömb középpontjában helyezkedik el. A gömbközep a gömb külső felületének távolsága nagy pontossággal ismert.



2.ábra

A FARO Vantage Laser Tracker működési elve I. [2]

A Tracker egy lézersugarat bocsát ki, amely visszaverődik a mérést végző személy kezében lévő SMR-nek (Spherically Mounted Retroreflector) nevezett mérőgömből és visszajut a fejbe (ld. 2. ábra). Amint a fény visszatér a fejbe az eszközben lévő távolságmérő meghatározza a mérőgömb távolságát. Az FARO Vantage Laser Tracker esetén a távolság meghatározása a fázismérés eljárásán alapul, amely úgy működik, hogy a fej ismert hullámhosszúságú jelet bocsát ki az SMR felé, majd a visszaverődést követően méri a kibocsátott és a visszaérkező jelek fáziskülönbségét. A távolságméréssel egyidejűleg meghatározásra kerül a vízszintes és függőleges tengely körül forgásszög is (ld. 3. ábra). Az összegyűjtött koordináta adatokat a műszer egy mérőszoftverbe továbbítja.



3.ábra

A FARO Vantage Laser Tracker működési elve II. [2]

A mérendő munkadarab letapintását követően a felvett pontokat a műszer a hozzá csatlakoztatott mérőszoftverbe, a FARO CAM2-ba továbbítja. A FARO CAM2 egy rendkívül hatékony eszköz a mért elemek kiértékeléséhez. A mérési folyamat előtt lehetőség van a munkadarab CAD modelljének beimportálására és ún. kiállítására, ami a valós darab és a CAD modell megfeleltetését jelenti. A kiállítás egyik nagy előnye, hogy minden mérendő geometriai elem névleges értéke (hosszméretek, átmérők stb.) a CAD modellben van kódolva, így a mért és a nominális elemek összehasonlítása azonnal elvégezhetővé válik.

A visszatérő mérések esetén a felhasználó mérőprogramot is készíthet, amelyet akár - a pontfelvételt elősegítendő - különböző animációkkal is kiegészíthet. A mérőprogram elkészítése során lehetőség van a munkadarabról készült képek beillesztésére, valamint a mérési pontok helyének kijelölésére, sőt akár az is előírható, hogy egy geometriai elemet pontosan hány pontból kell letapintani. Így minimalizálható a szubjektum okozta hiba.

A mérés kiértékelése történhet a pontfelvétellel egyidőben vagy a mérési folyamatot követően. A felvett pontokból számított geometriai elemek egymással is kapcsolatba hozhatók (pl.: két sík távolsága, két egyenes hajlásszöge, különböző helyzetűrések meghatározása stb.) A műszaki rajzon ellenőrzésre előírt méretek és geometriai jellemzők kiértékelését követően a felhasználó egyetlen kattintással jegyzőkönyvet készíthet. A szoftverben számtalan előre definiált sablon áll rendelkezésre, de akár saját sablonokat is készíthetünk.



4. ábra
A munkadarab CAD modellje és a mért geometriák

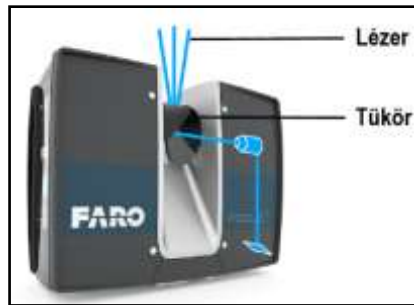
Fontos megjegyezni, hogy a pontfelvétel csak akkor lehetséges, ha a tapintógömb a Tracker látómezőjében helyezkedik el. Előfordulnak azonban olyan mérési feladatok (alámetszett felületek, belső furatok, takart felületek mérése stb.), amikor kiegészítő elemekre, mérési segédeszközökre, egy ún. adapterkészletre van szükség. A készlet síkok, élek, külső és belső henger felületek stb. méréséhez tartozó adaptereket tartalmaz, melynek segítségével jelentősen megkönnyíthető a mérési folyamat. A mérőszoftverben a pontfelvételt megelőzően ki kell választani, hogy milyen adapter van az SMR-hez csatlakoztatva. A program a megadott adapternek megfelelően automatikusan kompenzálja a mérési pont helyét.

A mérési eredmények pontosságát a távolság- és szögmérés pontosságán túl befolyásolja a hőmérséklet változása is. A mérési folyamat során kiemelten fontos a hőmérséklet-változásokat figyelemmel kísérni, éppen ezért minden Tracker alaptartozéka egy hőmérséklet szenzor, valamint ezen kívül a berendezés adatot gyűjt a nyomás-változásról és a páratartalomról is.

1.2. FARO Focus Laser Scanner

Ha nagyméretű, összetett szerkezetek mérésére van szükség, a lézerszkennerek praktikus és gazdaságos megoldást kínálnak. A hagyományos eszközökkel történő ellenőrzés gyakran időigényes és bizonyos térbeli méretek, geometriai jellemzők mérése sok esetben nem is kivitelezhető. Ezzel szemben a lézerszkennerek olyan érintkezésmentes eszközök, amelyek percek alatt sok millió diszkrét adatpontot rögzítenek egy objektum mérése során. A digitalizált állomány pedig különböző számítógépes szoftverek segítségével értékelhető ki.

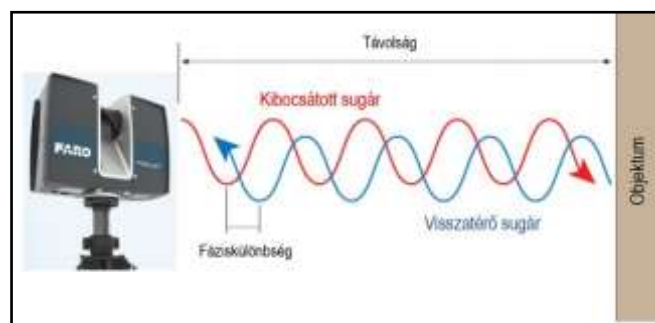
A FARO Focus lézerszkennerek az aktív érintkezésmentes technológiák közül a fázismérés eljárást használó mérőeszközök közé tartozik. A lézer fényforrás infravörös lézersugarat bocsát ki egy 45°-os szögben elhelyezett, a vízszintes tengelye körül forgó tükörről (ld. 4. ábra), miközben a fej 180°-os fordulatot tesz a függőleges tengelye körül. A szkennervej és a vízszintes tengelyű tükör összehangolt forgása közben a lézersugár végig pásztázza a szkennerek környezetét. A hatótávolságtól függően megkülönböztethetünk 70, 150 és 350 m mérési tartományú mérőeszközöket.



5. ábra
A lézerszkennerek működési elve I. [3]

A lézer útjában lévő objektumok visszaverik a nyalábot a szkennerekbe. A kibocsátott és a visszaérkező lézerjel közötti fáziskülönbség a távolságmérés alapja. Általánosságban elmondható, hogy a fázismérési eljárást használó lézerszkennerek pontosak, gyorsak és nagy felbontású adatokat szolgáltatnak. A távolságméréssel egyidejűleg a szkennerek rögzítik a tükör vízszintes- és a fej függőleges tengely körüli forgásszögét is. A távolság, a függőleges és a vízszintes szög gömbi koordinátákat (r, φ, θ) ad, amelyeket ezután derékszögű koordinátává alakítunk át (x, y, z).

Az egy pont-méréseket másodpercenként közel 1.000.000 alkalommal ismétljük meg. Az eredmény egy pontfelhő, amely a szkennerek környezetének több millió pontból álló milliméter pontos digitális leképezése. A pontfelhő sűrűsége és a mérési zaj különböző paraméterbeállításokon keresztül befolyásolható.



6. ábra
A lézerszkennerek működési elve II. [3]

A mérési elvből következik, hogy egyetlen álláspontból a mérendő objektum takarásban lévő részeiről nem kapunk adatot. Ahhoz tehát, hogy egy térbeli objektumot teljesen digitalizálni tudjunk több különböző álláspontból kell szkennelni, majd azokból egyetlen, összefüggő pontfelhőt kell létrehozni.

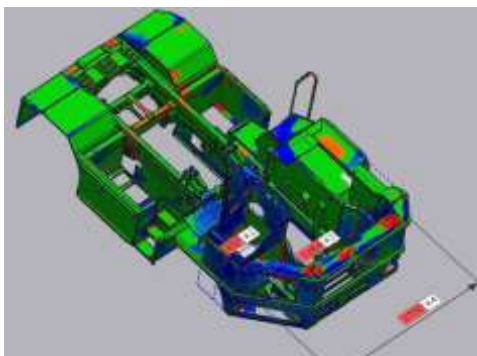
Az egyes álláspontok közötti kapcsolat létrehozására a FARO SCENE szoftver természetes vagy mesterséges referenciákat használ. A mesterséges referenciákat (jellemzően gömbök vagy sakktábla mintázatok) a mérést végző személy helyezi el a szkennelési térben, úgy, hogy bármely két álláspont közös részében legalább három pontra visszavezethető objektum legyen. Fontos kiemelni, hogy a mesterséges referenciák elhelyezése a szkennelési folyamatot megelőzően részletes tervezést igényel, mivel azok elhelyezkedése (mintázatuk), távolságuk a szkennertől és láthatóságuk alapvetően befolyásolja az összefűzés sikerét.

A természetes referenciákkal történő összefűzés során a szoftver a pontfelhőben található ismétlődő mintázatokat (pl.: falak, egyéb tárgyak a szkennelési térben stb.), használja a kapcsolat létrehozásához. A mintázatokkal létrehozott kapcsolat egy durva összefűzésnek tekinthető, amelyet finomítani szükséges. A szoftverben fejlett algoritmusok 30-40 iterációs lépésben csökkentik az összefűzés hibáját akár a milliméteres nagyságrend alá.

A szkennelési folyamatot követően a felhasználó beimportálja a FARO SCENE szoftverbe a felvett pontfelhőket. Az importálást követően szükség van a pontfelhő adatok feldolgozására. A feldolgozás jelent egyrészt szűrést és színezést, valamint ezen folyamat során ismeri fel a szoftver a szkennelési térben elhelyezett mesterséges referenciákat is. A feldolgozás és a referenciák felismerése teljesen automatikus.

A feldolgozás után következik a fent említett összefűzési lépés. Bármely módszert is használjuk az összefűzött pontfelhőben pont-duplázódások, sűrűség-különbségek lesznek megfigyelhetők. Ezért a folyamat utolsó lépéseként érdemes elkészíteni egy szűrt, tisztított, homogenizált pontfelhőt.

Bár néhány egyszerű mérési feladat (pl.: távolságok meghatározása) a FARO SCENE szoftverben is elvégezhető, jellemzően a szkenneléssel kapott adatállomány kiértékelése egy kifejezetten pontfelhő alapú minőségellenőrzésre optimalizált mérőszoftverben történik. A SCENE szoftverből az összefűzött, szűrt, tisztított, homogenizált állomány a szükséges formátumban exportálható.



7. ábra
A szintértékes eltérésvizsgálat eredménye

A Geomagic Control X szoftverben az program fejlett rutinjaival a beimportált pontfelhő és a CAD modell fedésbe hozható, majd ez a durva összefűzés több iterációs lépéssel finomítható. A mérési eredmények kiértékelésének egy jellemző módja az ún. szintértékes eltérésvizsgálat. Az eltérésvizsgálat során a pontfelhő pontjainak és a CAD modell felületeinek normál irányú eltéréseit határozza meg a szoftver. Ha az adott pont CAD felülettől mért normál irányú eltérése a felhasználó által definiált tűrésmezőn belül helyezkedik el, akkor a szoftver ezt a pontot zöld színnel jeleníti meg. A pont kék színnel jelenik meg, ha a normál irányú eltérés a tűrésmező alsó határértékén kívülre esik. A pont piros színű, ha ugyanezen differencia a tűrésmező felső határértékén kívüli érték. A szintérték egy rendkívül hatékony és gyors módja a mérendő objektum tűrésen kívüli részeinek azonosításának, illetve az eltérés mértékének vizuális megállapításának.

A Geomagic Control X szoftverben ezen kívül lehetőség van különböző egyszerű geometriai elemek (síkok, hengerek, tengelyek stb.) illesztésére a pontfelhőre. Az illesztést a szoftver minden esetben a legkisebb négyzetek módszerének megfelelően végzi el. A illesztett geometriai elemek a korábbiakhoz hasonlóan kapcsolatba hozhatóak egymással, így a méretek és a tűrések kiértékelhetők.

A mérési eredményeket ebben az esetben is a program automatikusan generálja. A jegyzőkönyv a mérési eredmények számszerű értékein túl tartalmazhatja a CAD modell és pontfelhő kiállítására vonatkozó statisztikai adatokat, valamint a szintértékes vizsgálat eredményét is, amely szükség esetén kiegészíthető a felhasználó által elhelyezett címkékkel, amelyek számszerűen mutatják meg az eltérés értékét a kijelölt pontban.

4. Alkalmazási lehetőségek hegesztett szerkezetek mérésére

A továbbiakban a hegesztett nehéz acélszerkezet gyártás főbb technológia lépésein végighaladva, áttekintjük, hogy milyen lehetőségeket biztosítanak számunkra a Laser Scanner és Laser Tracker mérőrendszerek. Bár az acélszerkezet gyártáshoz szervesen kapcsolódik az alkatrész gyártás is - üzemi méréseink során számos esetben használtuk ezen mérőrendszereket az alkatrész gyártás fázisában is -, azonban jelen cikkünkben az összeállítás-hegesztés-forgácsolás fő gyártási fázisok során nyert tapasztalatokat és lehetőségeket szeretnénk bemutatni.

4.1 Összeállítás

A hegesztett nehéz acélszerkezetgyártás első, fő technológiai lépését, az összeállítást megvizsgálva talán nem a legkézenfekvőbb alkalmazási lehetőség, hogy már az összeállítási művelet során egy alkatrész pozicionálásához használjunk egy modern mérőrendszert. Gyakorlati tapasztalataink azt mutatják, hogy igen jól használható a Laser Tracker rendszer ott,

ahol a hagyományos mérőeszközökkel csak közvetett módon, jelentős bizonytalanságú mérési módszer alapján tudnánk alkatrészünket pozícionálni.



8. ábra
Turbina járókerékház összeállítás

A 8. ábrán látható turbina járókerékház összeállítása során a nagyméretű hengeres alkatrészek, a csatlakozó karimák, illetve a fényképen sajnos nem látható talpak beállítása során jelentős előnyt jelentett a Laser Tracker rendszer alkalmazása, hiszen az online mérési eredményeknek köszönhetően nagy pontossággal tudtuk elvégezni a szerkezet összeállítását. Az összeállítás pontosságának növelése lehetőséget ad a forgácsolási ráhagyás csökkentésére, így a teljes gyártási költség jelentősen csökkenthető.

Természetesen a mérőrendszerek alkalmazásának legkézenfekvőbb lehetősége az összeállítást követően – még a munkadarab hegesztése előtt – az összeállítási méretek és alkatrész-pozíciók mérése/ellenőrzése. Könnyen belátható, hogy egy bonyolult, akár több száz alkatrészből álló termék esetében, amennyiben minden méretet hagyományos mérőeszközökkel szeretnénk leellenőrizni, akkor jelentős időráfordítással kell számolnunk, illetve ezen mérési eredmények - a szerkezet bonyolultsága miatt végrehajtott nagy számú közvetett, jelentős bizonytalanságú mérés miatt - nem minden esetben biztosítják a összeállítási hibák kiszűrését.



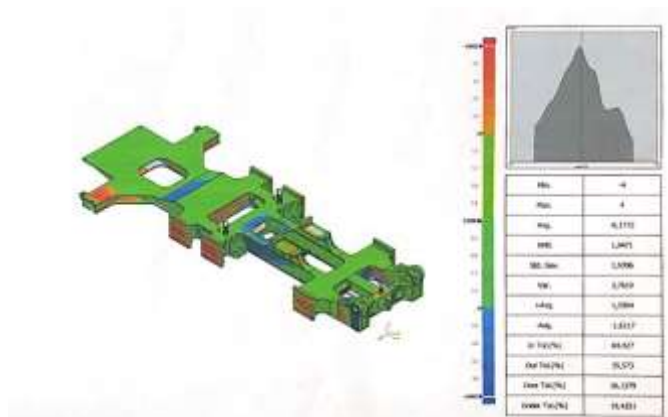
9. ábra
Alváz összeállítás bemérése Laser Scanner mérőrendszerrel

A 9. ábrán egy több száz alkatrészből összeállított alváz bemérése látható, melyet a Laser Scanner rendszerrel végeztünk el. A mérendő objektumot több irányból szkenneltük be, majd a sok száz millió mérési pontot tartalmazó pontfelhőket egymáshoz illesztettük és végül azt a munkadarab CAD modelljével összevetettük. A szintérképes eltérésvizsgálat eredménye a 7. számú ábrán látható. A vizsgálati eredmény alapján könnyen beazonosíthatóvá váltak az összeállítás során keletkezett méret- és pozíció eltérések, valamint a szintónusoknak köszönhetően az eltérés és az előírt tűrésmező viszonya is jól érzékelhető. A mérési eredmények alapján könnyen eldönthető, hogy az adott eltérést a termék funkciója, illetve minőségi követelményei alapján szükséges-e javítani. Ezen mérési módszer kifejezett előnye, hogy a bonyolult nehéz acélszerkezetek esetén fellépő

egyik legjellemzőbb összeállítási hiba - az „öltöztető” elemek/alkatrészek pozícionálási hibái - hatékonyan észlelhető, ezáltal a reklamációk száma és költsége jelentősen csökkenthető.

4.2 Hegesztés

A következő gyártási fázis, a hegesztés, ahol az egyik fontos mérési feladat a hegesztési deformációk feltérképezése. Tekintettel arra, hogy a deformációk teljes körű feltérképezéséhez lényeges, hogy nagy számú mérési pont álljon rendelkezésünkre, ezért ezen mérések elvégzésére az összeállítás során is használt Laser Scanner rendszer alkalmazása a legcélravezetőbb.



10. ábra
Hegesztési deformáció feltérképezése Laser Scanner rendszerrel

A hegesztési deformáció 10. ábrán látható feltérképezésével olyan információk birtokába juthatunk, melyeket a gyártás későbbi, forgácsolási fázisában fel tudunk használni. Az összeállított és a hegesztett állapot összehasonlításával jól értékelhetővé válik a hegesztés okozta deformáció, melyet a megvalósult hegesztési sorrend ismeretében fel tudunk használni az ismétlődő vagy a sorozatgyártás során olyan hegesztési sorrend vagy merevítés meghatározásához, mely kisebb deformációt eredményez.

A Laser Scanner rendszer másik előnye, hogy a mérés során nagy felbontású fotó dokumentációt készít a termékről, ami a több irányú felvételek összefűzését követően egy 3 dimenziós fotóként áll rendelkezésünkre. Ezen fotó dokumentáció használható a hegesztett nehéz acélszerkezetek üzemi vizuális ellenőrzésére – hangsúlyozva, hogy ez alatt nem a vizuális varratvizsgálatot értjük –, illetve esetleges reklamáció esetén visszaellenőrizhető a termék gyártási fázisú kondíciója. Fontosnak tartom kiemelni, hogy ezen fotó dokumentáció vizuális ellenőrzése „offline” módon is történhet, azaz a termék gyártása – amennyiben a mérési eredmények megfelelőek – folytatható és vele párhuzamosan végezhető a vizuális ellenőrzés. Gyakorlati tapasztalatok alapján ezen fotó dokumentáció élessége lehetővé teszi a termékre írt feliratok (pl. sorszám, hegesztő azonosító a varratok mellett) és egyéb információk rögzítését is.

Természetesen a Laser Tracker rendszerrel is mérhető a deformáció mértéke, azonban a Scanner rendszerhez képest jelentősen kevesebb pontot tudunk rögzíteni azonos időráfordítás mellett. A Laser Tracker rendszerek előnye, hogy nagyobb pontossággal térképezhető fel a deformáció, ezért ezt a módszert olyan esetekben alkalmaztuk, amikor egy szűkebb terület deformációjáról nagy pontosságú információra volt szükségünk.



11. ábra
Hegesztési deformáció feltérképezése Laser Tracker rendszerrel

A hegesztést követően amennyiben szükséges a termék egyengetése, természetesen ezen mérőrendszerek hasonló feltételekkel használhatóak és az egyengetés utáni állapot ismeretében értékelhető az elvégzett egyengetés hatékonysága.

4.3 Forgácsolás

A forgácsoláshoz kapcsolódóan a legelterjedtebb a Laser Tracker rendszerek alkalmazása. Ezen rendszerek segítségével a forgácsolt méretek – hasonlóan az összeállításhoz – akár forgácsolás közben is mérhetők (pl. nagy átmérőjű termékek, forgácsoló gép mérettartományán kívül eső bázisfelülethez kapcsolódó mérések, melyekhez hagyományos mérőeszközökkel nem rendelkezünk). Számos esetben végeztünk forgácsolás közben Laser Tracker-es mérést/ellenőrzést.

A forgácsolást követő mérések esetében a CAD modell szoftverbe történő importálásával a mért értékek közvetlenül hozzárendelhetők a CAD modellben található felületelemekhez. Ezzel a módszerrel a mérési eredmények szinte azonnal kiértékelhetővé válnak. Ennek feltétele, hogy rendelkezésre álljon egy, a mérés szempontjából megfelelően definiált CAD modell, amely tartalmazza a felületelemekhez tartozó alak és helyzetpontossági tűréseket.

Gyakorlati tapasztalat, hogy a vevőink által biztosított CAD modellek jellemzően nem tartalmazzák ezen információkat. Fontos kiemelni, hogy a CAD modell és a munkadarab illesztését megfelelően kiválasztott, nagy pontosságú felületelemhez kell elvégezni. Ellenkező esetben a CAD modellben megadott alak és helyzet tűréseket nem, vagy csak jelentős utómunkálatokat követően tudjuk felhasználni a mérési eredmények kiértékelése során.

A Laser Tracker rendszer alkalmazása lehetőséget nyújt a forgácsoló gép pontosságának bemérésére is. A főorsóba megfelelő célszerszámmal elhelyezett tapintó gömbbel mérhetők a lineáris és interpolációs mozgások és a gépvisszaállási pontossága is.

A Laser Scanner rendszert bár közvetlenül mérésre nem használtuk forgácsolás esetében, azonban a hegesztés utáni deformált állapot eredményét alkalmazni tudtuk a forgácsolási program korrigálására. A deformált alak ismerete lehetővé teszi egy CAD-CAM rendszer alkalmazása esetén, hogy a forgácsolási programot offline módosítsuk és megfelelő pozícióba billentsük a darabot a forgácsolási ráhagyások elosztása érdekében. Így a termék kiállítása a forgácsoló gép munkaaasztalára lényegesen gyorsabban végezhető el és nem szükséges a forgácsolási program módosítása a forgácsolás során, így jelentős időt lehet megtakarítani.



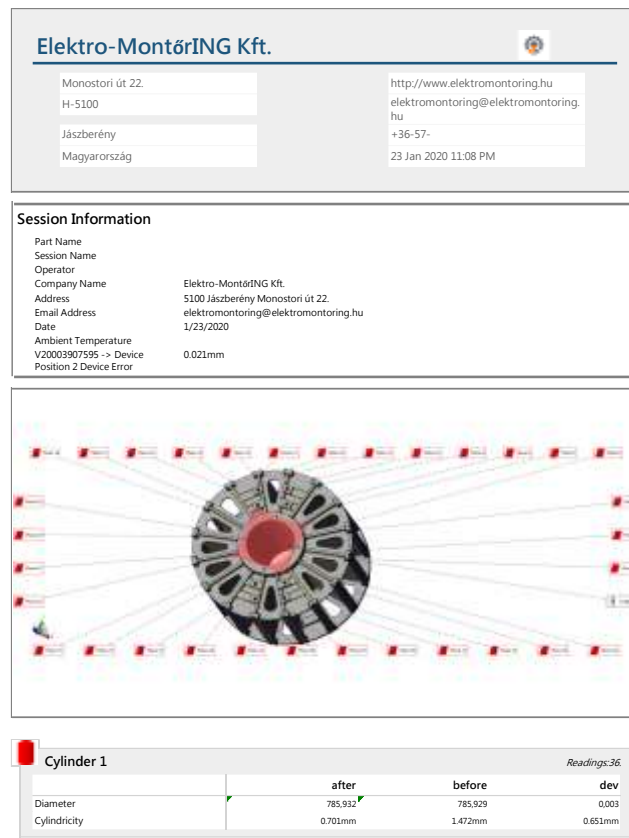
12.ábra

Hegesztett nehéz acélszerkezet kiállítása a hegesztési deformáció figyelembevételével

4.3 Mérési eredmények dokumentálása

A mérés utolsó fázisa, a mérési eredmények dokumentálása. Hagyományos mérőeszközökhöz képest ezen modern mérőrendszerek alkalmazása számos előnyt hordoz magában. A mérési eredmények azonnali rögzítése lehetővé teszi, hogy minden mérési eredmény dokumentálásra kerüljön. A rendelkezésre álló eredmények későbbi elemzése során kiértékelhető a mért pontok számossága, az eredmények eloszlása. Ezen kívül, ha sikerül beazonosítani egy hibás mérési pontot, akkor ez az érték kihagyható a mérési eredmények értékeléséből. A mért felületelemek egymáshoz képesti helyzet- és alakpontosságára vonatkozó adatok a bázis felületek utólagos kijelölése után is megoldható, így a gyártási rajznak megfelelő méretek közvetlenül értékelhetők.

A mérési jegyzőkönyv testre szabható és azonos alkatrészekhez méréséhez a komplett mérési folyamat elmenthető és animálható, ezzel jelentősen megkönnyítve a mérést végző személy számára a mérés elvégzését.



13.ábra
FARO CAM2 alkalmazásban elkészült mérési jegyzőkönyv

5. Alkalmazási lehetőségek összefoglalása

A 14. ábrán összefoglaltuk a Laser Tracker és Laser Scanner rendszer alkalmazási tapasztalatait, mely alapján elmondhatjuk, hogy a Tracker rendszer alkalmazásának előnye nagyfokú pontosságában és az univerzális alkalmazhatóságában rejlik. Hátránya, hogy nagy számú mérési pont rögzítése esetén a mérés időtartama jelentősen megnövekszik.

Ezzel szemben a Scanner rendszert pont ezen feladatokra – azaz a bonyolult hegesztett nehéz acélszerkezetek összeállításának ellenőrzésére és a deformációk feltérképezésére – tudtuk jól kihasználni. A szkennel rendszer hátránya az alacsonyabb pontosság és a mérési eredmények összetettebb utómunkálatti igénye.

Alkalmazási lehetőségek	Laser Tracker	Laser Scanner
Mérés támogatás összeállítás közben	+++	+
Méret ellenőrzés összeállítás, hegesztés során	++	+++
Hegesztési deformációk feltérképezése	+	+++
Egyengetési deformációk feltérképezése	+	+++
3D modell korrigálása valós méretekre CAD-CAM felhasználás	+	+++
Forgácsolás közbeni mérések	+++	+
Forgácsolt méretek ellenőrzése	+++	+
Mérési eredmények részletes kiértékelése	+++	+++
Jelmagyarázat: + - alkalmas korlátozottan; ++ - alkalmas; +++ - alkalmazása előnyös		

14.ábra
Laser Tracer és Laser Scanner rendszer alkalmazási lehetőségeinek összehasonlítása

Az alkalmazásuk kezdeti időszakában „egyszerű” mérőeszközöknek tekintettük a Laser Tracker és Laser Scanner mérőrendszereinket, azonban mérési/ellenőrzési feladatok elvégzése során egyre szélesebb körben kezdtük alkalmazni és

olyan tapasztalatokat szereztünk, melyek azt mutatják, hogy ezen mérőrendszerek alkalmazása sok lehetőséget nyújt a hegesztett nehéz acélszerkezet gyártása területén.

Irodalomjegyzék

- [1] FARO Technologies Inc. - FARO Laser Tracker Accessories October 2020 (2020.)
- [2] Mike Fisher – FARO Technologies, An introduction to FARO (2016.)
- [3] FARO Technologies Inc. – SCENE 2020, FARO Focus Laser Scanners, Training Workbook (2020.)

AZ ULTRAHANGOS ÉS AZ ELLENÁLLÁS PONTHEGESZTÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA

COMPARISON OF THE ULTRASONIC AND THE RESISTANCE SPOT WELDING

Schramkó Márton¹

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész
és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Budapest, 1081 Népszínház u. 8
marcischramko@gmail.com

Kovács Tünde Anna²

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész
és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Budapest, 1081 Népszínház u. 8
kovacs.tunde@uni-obuda.hu

Absztrakt - Vékony lemezek hegesztésére, fémek kötés létrehozására számos eljárás alkalmas. Az autópárhányban, széles körben az ellenállás ponthegesztést alkalmazzák annak ellenére, hogy a megfelelő kötések elérése érdekében körültekintően kell beállítani a paramétereket. Ezzel szemben előnyös, hogy az ellenállás ponthegesztés jól automatizálható, robotokkal kiszolgálható. Az ultrahangos hegesztés még rövid múltat tekint vissza, alkalmazása általában a könnyű és színesfémek hegesztésében terjedt el, elektronikai alkatrészek fémek kötéseinek létrehozására. Az ultrahangos hegesztés automatizálása még nem terjedt el az ipari gyakorlatban, bár az ellenállás ponthegesztésnél tapasztalt módon megvalósítható.

Abstract – Many welding processes are suitable for joining thin sheets and creating metallic joints. In the automotive industry, resistance spot welding is widely used despite the need to carefully set parameters to achieve proper joints. Even, it is advantageous that the resistance spot welding can be well automated and serviced by robots. Ultrasonic welding still has a short history, and its use has generally spread in the welding of light and non-ferrous metals to create metallic joints in electronic components. Automation of ultrasonic welding is not yet widespread in industrial practice, although possible like in the case of the resistance spot welding.

1. Bevezetés

A vékony lemezek hegesztése igen kiemelt ipari feladat. Gyakran eltérő anyagú lemezek összekapcsolása is elvár, melyet különböző kötéstechnológiai eljárásokkal lehet megvalósítani. A gépkocsik az elmúlt 40 évben jelentősen megváltoztak a mechanikus rendszerekről a számítógépes rendszerekre. Ennek eredményeként fokozott szükség van az elektromágneses zavarssűrűkre (EMC) a mai elektromos és hibrid járművekben, más néven e-járművekben [1].

Az e-járművek fejlesztése során a legfontosabb prioritás annak biztosítása, hogy az egyes, nagyon korlátozott terekbe szorított rendszerek ne okozzanak kölcsönös interferenciát. Az elektromos járművek egyedi kialakítása miatt a mérnököknek olyan elektronikus alkatrészeket kell használniuk, amelyek képesek ellenállni a rezgéseknek, az ütéseknek és a széles hőmérsékleti tartományoknak, miközben csökkentik az elektromágneses interferenciát, a feszültségcsúcsokat és a földáramokat. A tervező mérnökök számára elengedhetetlen annak biztosítása, hogy semmilyen interferencia ne érje a járművön kívülről a rendszereket.



1. ábra Villamos hajtású jármű vezérlés [2]

A zavarssűrűk Faraday kalitka elvén működnek így ennek zártnak kell lennie. A zavarssűrű ház elemei között tehát kohéziós kapcsolatot kell létrehozni. Hegesztéssel megvalósítható a kohéziós kapcsolat az összehegesztett darabok között, míg

forrasztással vagy ragasztással nem. Emellett a forrasztás és ragasztás során az alapanyagoktól eltérő anyag (forraszanyag, ragasztó) is a kötésbe kerül, melynek mechanikai tulajdonságai befolyásolják az elérhető kötészilárdságot.

Két igen jellemző hegesztési eljárás terjedt el a vékonylemezek hegesztésére. Az egyik az ellenállás ponthegeztés, melyet 1916-ben szabadalmaztattak (US1168346A), majd ezt követően kezdték fejleszteni. Az ellenállási ponthegeztés az autópárhban alkalmazott legfőbb hegesztési eljárás, minden jármű több ezer ponthegeztést tartalmaz. Ezenkívül az ellenállási ponthegeztés önmagában vagy más kötési eljárásokkal, például ragasztókötéssel vagy lézeres hegesztéssel kombinálva a BIW alkalmazásokban végzett összes hegesztés több mint 70%-át teszi ki. A gépjármű-összeszerelő üzemek legújabb befektetési és felszerelés-frissítési trendjei világsszerte azt sugallják, hogy az ellenállási ponthegeztési eljárás a következő években is domináns eljárás lesz az autópárhban.

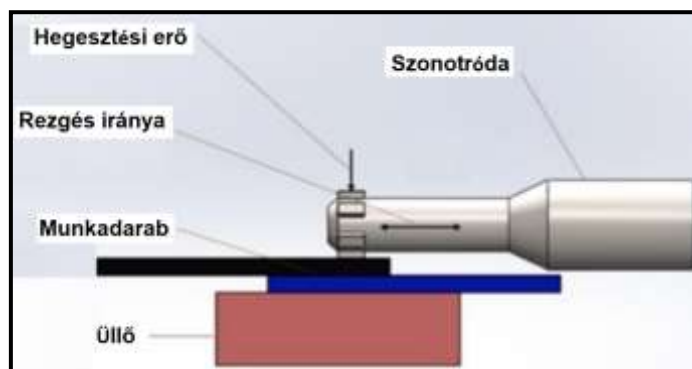
Az ultrahangos hegesztést az 1940-es években fejlesztették ki, ipari környezetben 20 évvel később, az 1960-as években egy véletlen folytán jelent meg. Ebben az évtizedben Robert Soloff a Branson Instruments nevű cégnél műanyag fóliák zsákokká való hegesztésével foglalkozott, egyszer véletlenül túl közel emelte a hegesztő szondát egy műanyag szalag adagolóhoz, ami ezért összehegedt vele. Rájött, hogy az ultrahang szilárd, akár egészen rideg anyagokban is terjed, ide-oda mozogva, összehegesztve akár teljes, nagyobb kiterjedésű munkadarabokat is. Az első műanyag játékautót e technológiával gyártotta egy Sonics & Materials nevű cég 1969-ben, melynek alapítója és vezérigazgatója Robert Soloff.

Az ultrahangos hegesztést a 70-es években még csak az elektrotechnikában használták finom huzalok kötéseinek kialakításához, de pár évvel később már műanyagok közötti kötések létrehozására is elkezdték felhasználni, így a módszer főleg ezen a területen terjedt el. Manapság az eljárás használata a műanyagokon belül is kiterjedt. Előfordul lágy, gyengén térhálósodott, de kemény polimerek, termoplasztikus elasztomerek egymáshoz kötése esetében is. Az autópárhban is megjelent a réz huzalok/kábelek egymáshoz, valamint alumíniumhoz való hegesztésére a gyújtásindító modulok esetében. Majd alumínium vékony lemezek, filmek hegesztésére is áttért a használata [3]. Manapság egyre terjed, mivel gyors, megbízható és egyszerű az alkalmazása.

2. Ultrahangos hegesztés

Ez a hegesztési eljárás akár a hideg sajtoló eljárások közé sorolható, hiszen a darabra nyomást helyezünk, a folyamat során csak kismértékben tapasztalható hőképződés mely legtöbbször az újra kristályosodási hőmérsékletet sem éri el. A hegesztés során nem szabadulnak fel a környezetre ártalmas anyagok, nincs a szemre ártalmas fénysugárzás sem így a technológia egy alacsony veszélyességi fokú eljárás, az egyetlen veszélyt az éles hang okozza, mely hosszútávon ártalmas a hallásra ezért ez ellen védekezni kell.

A hegesztési technológia két eljárásváltozata terjedt el, az egyik a ponthegeztő a másik a vonalhegesztő mód. Ezek elve mind két esetben ugyanaz, egyetlen lényeges különbség, hogy a vonal hegesztőgép esetében az üllök és a szonotróda is forgatható. Az ultrahangos ponthegeztőről az 2. ábrán látható sematikus rajz mutatja be a gép fő elemeit. Az eljárás a magnetosztatikus elven alapul, ezzel kelti az ultrahangos rezgéseket, melyet a transzformátor erősít fel, végül a rezgés eléri az általunk meghatározott mértéket ekkor a szonotródába vezetjük. A szonotróda és az üllök között összeszorított lemezek között kialakul a kötés. A kötés kialakulása közben a két lemez felülete egymáson nagyon nagy frekvencián súrlódik és megfelelő paraméterek esetén létrejön a kötés [4].



2. ábra Ponthegeztő berendezés sematikus ábrája [4]

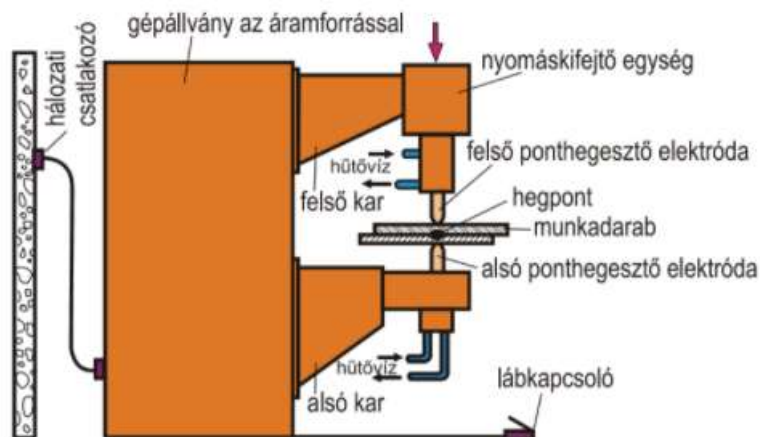
A hegesztés során az anyagminőség függvényében változik a hőmérséklet, illetve a magas ismétlődő igénybevétel miatt nem minden anyag hegeszthető az eljárással. Eleinte a technológiát csak műanyagok hegesztésére használták ám később kiderült,

hogy fémek hegesztésére is alkalmas. Gyakran használják alumínium-réz, réz-réz, acél-réz hegesztése során, illetve vegyes kötésekhöz. A technológia több helyen előfordul, például az autóiparban (zavarsűrő házak, villamos csatlakozások hegesztése), de igazából a legtöbb lágy anyagminőség hegeszthető vele. A legnagyobb előnye hogy az anyagok széles skálája hegeszthető ezzel az eljárással és berendezéssel. A hegesztő berendezésen nem kell változtatni csak a hegesztési paramétereken a különböző anyagminőségek hegesztése során.

Felhasználhatóságnak korlátja, hogy csak vékony lemezek közti kötés kialakítására célszerű használni. Figyelembe kell venni, hogy a hegesztés során a munkadarabot komplex hatások érik, ezért tapasztalható keménység változás [5]. A kristály szerkezet nem változik csak a diszlokációk vándorolnak a darabban. Az anyagtulajdonságok nem módosulnak nagymértékben, a megfelelő paraméterek beállítása esetén.

3. Ellenállás ponthegeztés

A vizsgált eljárás a 212-es számjelű kétoldalú (direkt) ellenállás ponthegeztés. A technológia alapja, hogy az áramforrás által fejlesztett áramot a ponthegeztő elektródákon át a munkadarabba vezetjük. Az elektródák kialakítása lehet kúpos vagy gömbvégeződésű, a kétoldalú ellenállásos ponthegeztőgép felépítése a 2. ábrán látható [6].

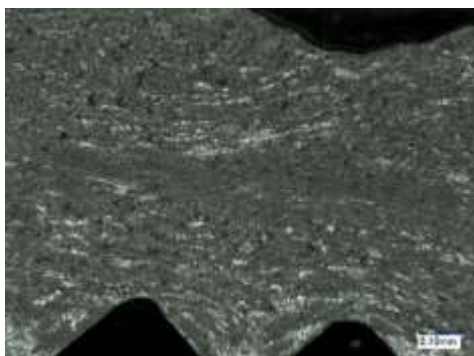


3. ábra Kétoldalú ellenállás ponthegeztőgép [6]

A hegesztés során a két hegesztő elektróda között befogott lemezek ellenállásából adódó joule-hő hatására a munkadarabok között egy lencse alakú olvadék fürdő képződik, mely megszilárdulva alkotja a lencseszerű pontvarratot [6, 7]. (Miután az anyag megolvad és közben erőt is fejtünk ki emiatt ezt a hegesztési módszert az ömlesztve sajtoló hegesztések közé helyezzük el.) A stabil kötés megalkotása miatt az áramforrás levétele után még egy rövid ideig fenntartjuk a terhelő erőt a darabon, ezzel a lépéssel csökkenthető a szivódási üregek és repedések kialakulása, ezáltal javul a reprodukálhatóság a hegesztés során. A gépet biztonságosan lehet használni egészen 6 mm-es vastagságú alumínium, acél, réz, stb. lemezek hegesztésére, amihez csupán az áramerősséget kell változtatni 10-50 kA között. A technológia nélkülözhetetlen az autó iparban például a karosszéria gyártás során. Ellenállás ponthegeztés alkalmas több lemez összehegesztésére is egy lépésben.

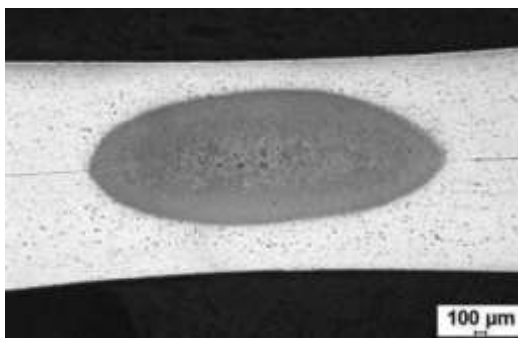
4. Vékony lemezek hegesztése

Vékony lemezek hegesztésére alkalmas az ellenállás ponthegeztés és az ultrahangos hegesztés is. Hőbevitel szempontjából azonban eltérést tapasztalunk. Míg az ultrahangos hegesztés esetében a munkadarab nem hevülhet olvasáspontig az ellenállás ponthegeztés során a hegpontban a lemezek összeolvadnak. A hőhatás övezet ezért eltérően értelmezendő. Az ultrahangos kötésben nem definiálható az ellenállás ponthegeztésnél tapasztalható hőhatás övezet (4. ábra).



4. ábra Ultrahangos hegesztéssel készült kötés metszete

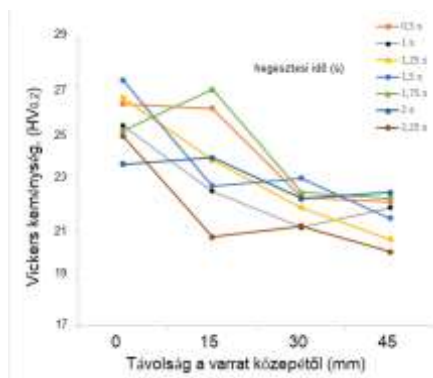
Az ellenállás ponthegeztés során a lemezek összeolvasása során keveredés léphet fel, valamint a megolvadt varratpont körül felhevült anyagban átkristályosodás valamint újrakirtályosodás jöhet létre (5. ábra). Az anyagminőség és a hegesztési paraméterek függvényében fázisátalakulások is bekövetkezhetnek, mely a mechanikai tulajdonságok változását okozza. Nagyszilárdságú acélok esetében a hőhatás övezetben létrejövő változások jelentős keménység változást okoznak [8, 9].



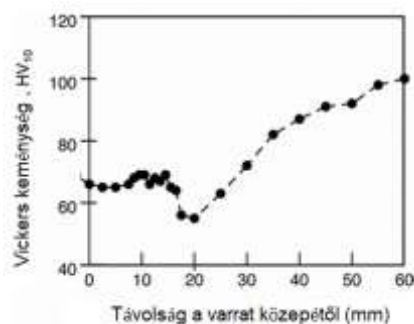
5. ábra Ellenállás ponthegeztett varrat metszete [10]

Az ultrahangos hegesztés és az ellenállás ponthegeztés eljárás sajátosságainak következtében a hegesztés során eltérő hatások érik a munkadarabot és ennek eredményeként eltérő változások tapasztalhatók a mikroszerkezetet és mechanikai tulajdonságokat illetően. Saját kísérleteink tapasztalatai valamint irodalmi hivatkozások alapján fontos megjegyezni, hogy az ellenállás ponthegeztés során keletkező hő sokkal jelentősebb változásokat okoz a fémek mikroszerkezetében (főként acélok esetében [11, 12]), ezáltal mechanikai tulajdonságait tekintve is, mint az ultrahangos hegesztés komplex hatása.

A hegesztés hatására kialakuló keménység eloszlás eloszlást mutat (6. és 7. ábra). Természetesen csak adott alapanyagra és hegesztési paraméter együttesre érvényes, de közel azonos összetételű alumínium ötvözetek esetében is látható a két eljárás hatására kialakuló keménység különbség.



6. ábra Ultrahangos hegesztett varrat keménységeloszlása



7. ábra Ellenállás ponthegeztett varrat keménységeloszlása [13]

Az ultrahangos hegesztés hatására a vizsgált alumínium ötvözet varrata mutat nagyobb keménységet, míg a ponthegeztett alumínium ötvözet varratkeménysége az alapanyagnál kisebb. Az alkalmazott alumínium ötvözet és lemezvastagság esetében mind a két eljárás alkalmas kohéziós kötés létrehozására.

Összefoglalás

Következtetésként elmondható, hogy mind a két technológia a hőhatásövezet kicsi. Gazdasági szempontból nézve a kiszolgáló személyzet minősítettsége, valamint a termelékenység azonosnak tekinthető. Előnyös az ellenállás ponthegeztés oldalára, hogy sokkal szélesebb skálán használható a lemez vastagság tekintetében.

Végül szempontunkból döntő különbség, hogy az ultrahangos hegesztés esetében nem kerül a munkadarab ezáltal az elektronikai alkatrész áram alá, így az nem károsodhat a hegesztés során és ez a zajszűrők esetében előírás.

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalomjegyzék

- [1] Joseph Pulomena: Dealing with EMC filtering in today's electric and hybrid vehicles, EPCOS, a TDK Group Company, 2018.02.02. <https://www.ept.ca/2018/02/dealing-emc-filtering-todays-electric-hybrid-vehicles/>
- [2] <https://www.schaffner.com/markets/automotive/>
- [3] Genesis-Ultrabond: A considered history of Ultrasound weboldal; 2008-2010. <http://www.genesis-ultrasound.com/history-of-ultrasound.html>
- [4] Bhudolia, S.K.; Gohel, G.; Leong, K.F.; Islam, A. Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review. Materials 2020, 13, 1284. <https://doi.org/10.3390/ma13061284>
- [5] Kovács Tünde Anna: Experimental study of the ultrasonic welding effects in the metal joint microstructure, JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES (1742-6588 1742-6596): 1527 p. 012021. (2020)
- [6] Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő: Hegesztéstechnika I. (Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010., p. 20-30. p. 34-35.
- [7] Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő: Hegesztéstechnika II. (Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010., p. 15-18.
- [8] Varbai Balázs, Sommer Christina, Szabó Mihály, Tóth Tamás, Májlinger Kornél: Shear tension strength of resistant spot welded ultra high strength steels, Thin-Walled Structures Elsevier 142 (2019) 64-73

- [9] Varbai Balázs, Tóth Tamás Krisztián, Sommer Christina, Májlínger Kornél: Ultrahang szilárdságú acéllemezek ellenállás-ponthegesztett kötéseinek optimalizálása, In: Barabás, István (szerk.) XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, Erdélyi Magyar Tudományos Társaság (2019) pp. 601-604., 2019
- [10] <https://www.ahssinsights.org/news/understanding-differences-in-welding-steel-vs-aluminium/>
- [11] Kiss László, Májlínger Kornél, Varbai Balázs: Nagyszilárdságú acéllemezek ellenállás-ponthegesztett kötéseinek optimalizálása, In: Csibi Vencel-József (szerk.) (szerk.) OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 25th International Conference on Mechanical Engineering. Kolozsvár, Románia, 2017.04.27-2017.04.30. Kiadvány: Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), 2017. pp. 219-222., 2017
- [12] Tóth Tamás, Májlínger Kornél: Kiemelten nagyszilárdságú acél vékonylemezek ellenállás-ponthegesztett kötéseinek optimalizálása kísérlettervezési módszerrel, In: Török Imre (szerk.) (szerk.) 29. Nemzetközi Hegesztési Konferencia. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2018. pp. 151-160., 2018
- [13] https://www.researchgate.net/figure/Hardness-survey-mid-thickness-in-25mm-thick-6082-T6-aluminium-weld_fig9_250340380

EGY HEGESZTETT KÖTÉS MARADÓ FESZÜLTSGÉNEK ÜZEMI FESZÜLTSGÉRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK A MEGHATÁROZÁSA NUMERIKUS SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL

NUMERICAL SIMULATION TO DETERMINE THE EFFECT OF WELDING RESIDUAL STRESS ON OPERATING STRESS OF A WELD JOINT

Spisák Bernadett

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási
Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519
Miskolc, Iglói út 2

bernadett.spisak@bayzoltan.hu

Bézi Zoltán

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási
Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519
Miskolc, Iglói út 2

zoltan.bezi@bayzoltan.hu

Szávai Szabolcs

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási
Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519
Miskolc, Iglói út 2

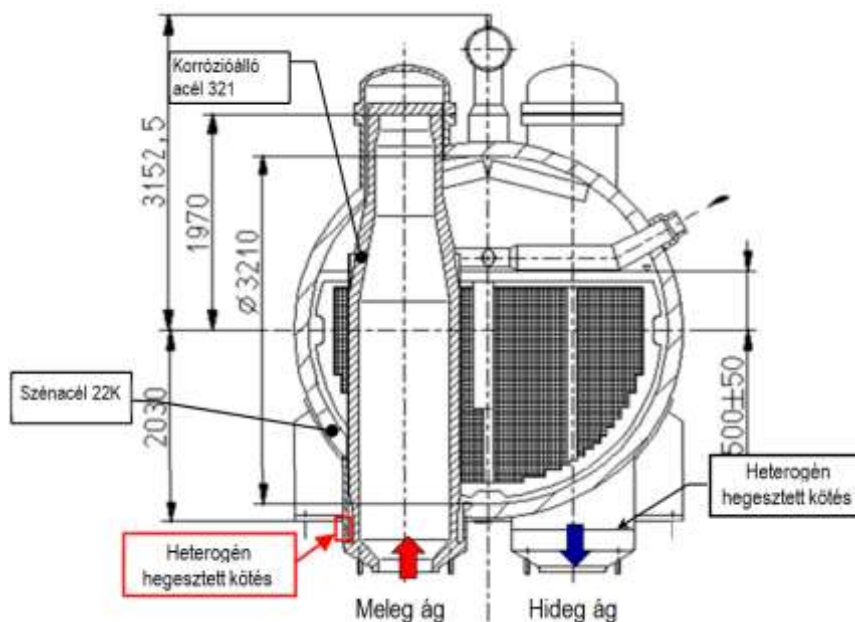
szabolcs.szavai@bayzoltan.hu

A hegesztés velejárója a maradó feszültségek jelenléte, amely heterogén hegesztett kötések esetében még utóhőkezeléssel sem szüntethetők meg teljesen, ezáltal a bekövetkező hegesztési hibák vizsgálatakor figyelembe veendő. Ebben a cikkben egy heterogén hegesztett kötés 2D szimulációs eredményeit mutatjuk be, ahol hőmérséklet és fázisfüggő anyagparaméterek kerültek beépítésre. Az eredmények felhasználhatók az adott komponens valós terhelési körülményeinek a meghatározására.

Welding is accompanied by the presence of weld residual stresses, which in case of dissimilar metal welds even with postweld heat treatment can not be removed therefore should be taken into account when assessing possible welding defects. In this paper the results of 2D simulations of a dissimilar metal weld is introduced, where temperature and phase dependent material properties were implemented. The results can be used to determine the real load conditions of the given component.

1. Bevezetés

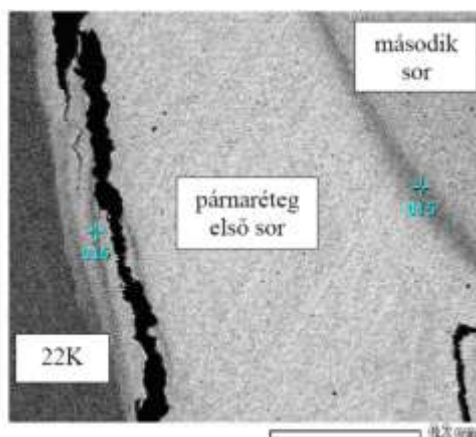
A vegyiparban, illetve a nukleáris iparban gyakran alkalmaznak hegesztett kötések a különböző komponensek összehegesztésére. Számos nukleáris erőműben a heterogén hegesztett kötések a rendszer egy gyenge pontjának bizonyultak. Ezek a varratok érzékenyek a feszültségkorróziós repedésre, ezáltal a tervezett üzemidőhöz képest a rendszer üzemelési ideje lerövidülhet [1], [2]. Ezekre az egyik példa a VVER-440-es típusú atomerőművek gőzfejlesztőjében (GF) keletkezett komoly repedési problémák a primer kollektor és a gőzfejlesztő tartály csonkját összekötő heterogén hegesztett kötésben [3], [4]. Az ilyen típusú reaktornak hat hurokkal rendelkezik, amely hat horizontális elhelyezésű gőzfejlesztőt tartalmaz. Ezek horizontális nyomástartó edények, amelyek vertikális hengeres forró és hideg kollektorokkal vannak ellátva. Ezt szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra
Horizontális VVER 440 gőzfejlesztő keresztmetszete [4]

A kollektorok ausztenites acélból (08H18N10T) készültek, míg a gőzfejlesztő köpenyt szénacélból (22K) állították elő. Ennek a két résznek az összehesztésénél heterogén hegesztett kötés jön létre. A gőzfejlesztő szekunder oldalán a GF csomák és a primer kollektor között egy úgynevezett „zseb” található. Ebben a térben, a hatékony lefűtás hiánya miatt magasabb korróziós potenciálú másodlagos közeg található. A korrózív közeg és a létező feszültségek együttes jelenléte szemcseközi korróziót okozhat. A jelen lévő feszültségek az ausztenites acél és a szénacél eltérő hőtágulási tulajdonságaiból származó termikus feszültségek és a primer körből a GF csomákra ható külső feszültségek együttes jelenlétéből származnak.

Az egyik megoldás erre a problémára a javító hegesztések alkalmazása. Oroszországban ennek a javításnak az elvégzését megelőzően mintát vágtak ki, amelyre különböző fémtani vizsgálatok készültek [5]. A 2. ábra a hiány közelében mutatja be a varrat mikroszerkezetének egy részletét. Az ábra jól szemlélteti a szemcseközi korróziós repedést, amely a szénacél (22K) és az első párnaréteg között alakult ki. Emellett a képen még megfigyelhető az első és a második párnaréteg választóvonalai is. A vizsgálatok során visszaszórt elektron-diffrakció módszer segítségével a képen látható pontokban lokális kémiai összetételt határoztak meg. A kép alatt látható eredmények jól mutatják az ötvözőelemek hígulását.



Hely	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Teljes (tömeg%)
015		4,75	1,00	89,17	5,07		100,00
016	0,36	2,43		93,16	3,51	0,65	100,00

2. ábra
folytonossági hiány és lokális kémiai összetételek [5]

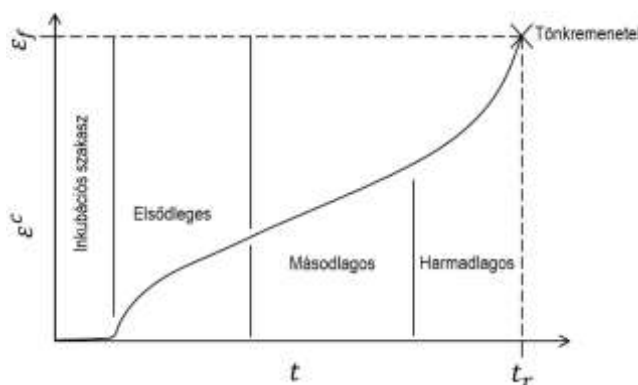
Ezekből a vizsgálatokból látszik, hogy a heterogén hegesztett kötések tanulmányozása fontos, és a gyártási folyamatból származó maradó feszültségek meghatározása szükséges ahhoz, hogy megállapítsuk az egyes gyártási folyamatok hatását, illetve ezen heterogén hegesztett kötések élettartamát.

Egy heterogén hegesztett kötés előállítása több lépésből tevődik össze. Ide sorolható a bevonatolás, a párnaréteg felhelyezése, a hegesztés utáni utóhőkezelés és a heterogén fém többsoros összehegesztése. A komplex szerkezeti kialakítás és gyártási folyamat miatt a maradó feszültségek meghatározása mérés segítségével bonyolult, ezáltal napjainkban egyre több esetben vizsgálták meg ezeket a szerkezetek numerikus analízis segítségével [6]-[8]. Ebben a munkában a VVER-440-es reaktor gőzfejlesztő transziens varratának az analízisére került sor, amelyben a szimulációk három részre oszthatók. Az első esetben az analízis nem tartalmazta a varratok kialakításának a folyamatát, csak az üzemi terheléseket, amelyek két csoportba oszthatók, termikus és mechanikai terhelések. A második esetben mind a párnarétegek, mind a kötővarratok hegesztésének a folyamatát belevettük a vizsgálatba, és csak ezt követően kerültek ráhelyezésre az üzemi terhelések. A heterogén hegesztett kötések esetében a párnarétegek felhelyezését követően utóhőkezelést alkalmaznak a maradó feszültségek csökkentésének az érdekében, ezáltal a harmadik esetben ennek a hőkezelésnek a figyelembevételére került sor. A következőkben az ehhez használt elméleti modell, és a szimulációkból kapott eredmények kerülnek bemutatásra.

2. Kúszás modell

Számos modell létezik a hőkezelési folyamat vizsgálatára. A képlékeny alakváltozás hatására bekövetkező feszültségmentesítési modell egy jól ismert modell, amelyben magas hőmérsékleten a folyáshatár csökkenése okozza a legnagyobb feszültségmentesítést. A modellek összehasonlításából adódik, hogy a feszültségmentesítésre a legnagyobb mértékben a kúszás modell hat.

Az időfüggő kúszási viselkedést négy szakaszra lehet osztani: inkubációs, elsődleges, másodlagos és harmadlagos. Az inkubációs szakasz a mozgó diszlokációk felgyülemelésével áll kapcsolatban. Az elsődleges kúszásnál korai, gyors nyúlás következik be, és a kúszási alakváltozási sebesség lecsökken. A másodlagos kúszási szakaszban a kúszási alakváltozási sebesség ($\dot{\epsilon}^c$) állandóvá válik, ahol a felkeményedést az új mozgó diszlokációk tartják egyensúlyban. Végezetül a harmadlagos kúszás akkor jön létre, amikor a kúszási alakváltozási sebesség felgyorsul és bekövetkezik a törés. Ezeket a szakaszokat szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra

Kúszási alakváltozás változása egy tipikus korrózióálló acél esetében [9]

Numerikus szimuláció esetében az ϵ^c meghatározására különböző modellek léteznek. Egy egytengelyű kúszási görbéhez az $\dot{\epsilon}^c$ általános alakját szemlélteti az (1)-es egyenlet, ahol a kúszási alakváltozás a feszültség, a hőmérséklet és az idő függvénye.

$$\dot{\epsilon}^c = f_1(\sigma, T, t) \quad (1)$$

A hőmérséklet függést a következő egyenlet segítségével lehet felírni:

$$\dot{\epsilon}^c = f_2(\sigma, t) e^{-Q/RT} \quad (2)$$

ahol Q az aktiválási energia, R a Boltzmann állandó és T az abszolút hőmérséklet. A kúszás feszültségfüggését leggyakrabban valamilyen energia-törvény kapcsolattal írják le, erre példa a Norton kúszás modell, ahol $\dot{\epsilon}^c$ konstans feszültség és hőmérséklet esetében a következő alakban írható fel:

$$\dot{\epsilon}^c = C \sigma^n \quad (3)$$

ahol C és n anyagállandók. A Norton kúszási modell a második szakaszban lévő, stacionárius kúszási alakváltozási sebességet írja le. Az átlagos kúszási alakváltozási sebességre hasonló összefüggés írható fel, ahol egy konstans kúszási alakváltozást feltételezünk adott feszültségen és hőmérsékleten. Azonban rövid idők esetén ez a modell a kúszási alakváltozást alul becsüli, míg hosszú idők esetében felülbecsüli. Korábbi esetben az utóhőkezelés vizsgálatához a Norton-féle stacionárius kúszási modellt alkalmazták [2], azonban ennél sokkal pontosabb kúszási alakváltozási modellek alkalmazhatók, amelyek többsége exponenciálisan függ az időtől. Az analízisbe az RCC-MR kúszási modell [10] került beépítésre, amely az elsődleges és másodlagos kúszási szakaszt kettéválasztja.

$$\varepsilon^c = \begin{cases} C_1 t^{C_2} \sigma^{n_1} & t \leq t_{fp} \\ C_1 t_{fp}^{C_2} \sigma^{n_1} + C \sigma^n (t - t_{fp}) & t > t_{fp} \end{cases} \quad (4)$$

ahol C_1 , C_2 , n és n_1 anyag konstansok és t az idő (órán). Az elsődleges kúszási alakváltozásnak a feszültséggel és az idővel egy erő-törvény kapcsolata van. A másodlagos kúszási alakváltozási sebességnél a maximális elsődleges kúszási alakváltozást az átmeneti idő, t_{fp} használatával lehet meghatározni, amely az az idő, ahol az elsődleges alakváltozási sebesség és a másodlagos alakváltozási sebesség megegyezik. Ez az idő a következő alakban írható fel:

$$t_{fp} = C_3 \sigma^{n_3} \quad (5)$$

Ahol a C_3 és az n_3 konstansok a következő alakot veszik fel:

$$C_3 = \left(\frac{C}{C_1 C_2} \right)^{\frac{1}{C_2 - 1}} \quad (6)$$

$$n_3 = \frac{n - n_1}{C_2 - 1} \quad (7)$$

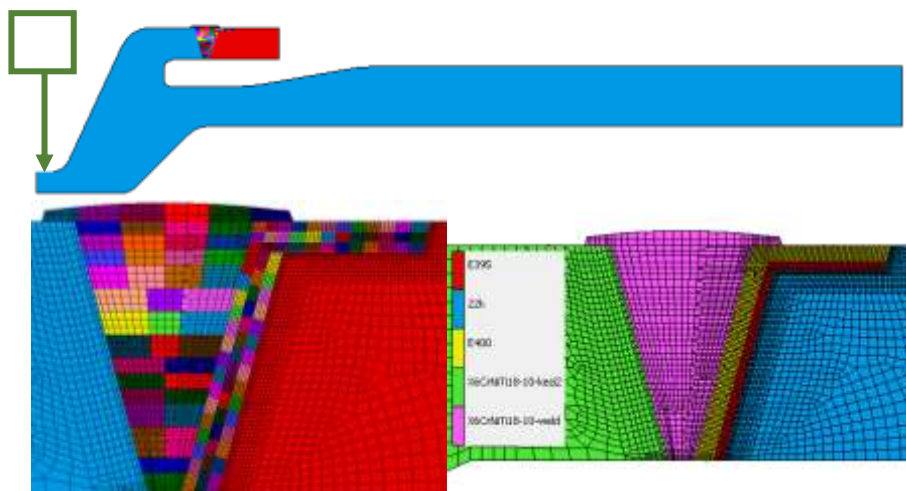
A szimuláció során a kúszási modellt egy szubrutin segítségével vettük figyelembe, amely az irodalomból vett konstans értékeket használ, a pontosabb eredmény érdekében ezen paraméterek mérése szükséges. Ezek láthatók az 1. táblázatban.

C_1	C_2	n_1	C	n
$2,96 \times 10^{-14}$	0,42	4,18	$5,29 \times 10^{-26}$	8,2

1. táblázat
RCC-MR kúszási modell konstans értékei [9]

3. Szimuláció felépítése

A szimuláció egyszerűsítésének az érdekében 2D-s szimuláció került kialakításra, amelynek geometriáját a 4. ábra szemlélteti. Az ábrából látható, hogy a szerkezet három párnaréteget tartalmaz, amelyben összesen 81 varratot helyeztek el.



4. ábra
2D szimuláció felépítése

A 4. ábra a geometria felépítése mellett tartalmazza az anyagok elhelyezkedését is. A szerkezetben található anyagok tulajdonságai a kémiai összetételük alapján a JMatPro szoftver segítségével kerültek meghatározásra. A kémiai összetételeket

a 2. táblázat szemlélteti. A szénacél esetében (22K) hőmérsékletfüggő, rugalmas-képlékeny izotróp keményedési és fázisfüggő anyagmodell került beállításra, míg az ausztenites anyagok esetében a Chaboche féle kombinált keményedési törvényt alkalmaztuk.

Anyag	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Co (%)	Mo (%)	Ti (%)
22K	0.29	0.40	1.0	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.02	-	-
EA-395/9	0.08	0.35	1.2	-	-	13.5	23	-	0.08	4.5	-
EA-400/10T	0.07	0.5	1.5	-	-	17	9.5	-	-	2	-
08H18N10T	0.08	0.08	1.5	0.02	0.035	17	9	-	-	-	0.4

2. táblázat
Alapanyagok kémiai összetétele

Ahogy már korábban említésre került három féle esetet vizsgáltunk meg, hegesztés nélküli, hegesztést tartalmazó, illetve hegesztés és utóhőkezelést tartalmazó végeelem analízisek, amelyekre minden esetben ráhelyezésre kerültek az üzemi terhelések. Ezek közül termikus terhelésként lett definiálva a környezet hőmérséklete, a primer kollektor belső (325°C) és külső (270°C) hőmérséklete. A mechanikai terheléseknél került beállításra a szerkezet megfogása mellett a szimmetria, a primer kollektor végein ható kompenzáló nyomások és a primer kollektor belső, illetve külső falára ható nyomások.

A varratok szimulálásához a Goldak-féle dupla elipszoid hőforrás modellt alkalmaztuk, ahol az alak paraméterei a szakirodalom és a hegesztési utasítás alapján lettek meghatározva. A hegesztési paramétereket a 3. táblázat tartalmazza. A hegesztés során keletkező felületi hővesztéseket az adott élekre megadott hőátadási tényezővel (20W/mK) és kibocsátási tényezővel (0,8) vettük figyelembe.

	Varrat száma	Hozaganyag	Hegesztési eljárás	Áramerősség [A]	Feszültség [V]	Áram típusa és polaritása	Hőbevitel [kJ/mm]
Párnaréteg 1	1-15	EA-395/9	111	125-135	24-25	DCEP	0.61
	16-45	EA-400/10T	111	140-150	25-26	DCEP	0.69
Párnaréteg 2	1-11	EA-395/9	111	125-135	24-25	DCEP	0.61
	12-36	EA-400/10T	111	140-150	25-26	DCEP	0.69
Kötőhegesztés	1	08H18N10T	141	70-80	24-25	DCEN	0.61
	2-43	08H18N10T	111	140-150	25-26	DCEP	0.69

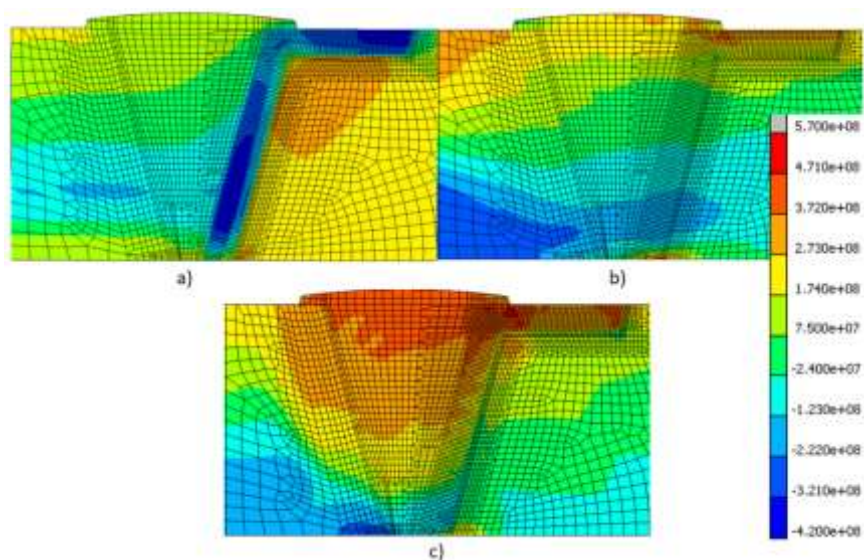
3. táblázat
Hegesztési utasítás főbb adatai

A harmadik esetben alkalmazott utóhőkezelés 665 °C-on történt meg, amelynek szimulálása a korábban bemutatott RCC-MR kúszási modell beépítésével valósult meg. Ehhez egy szubrutin előállítására volt szükség.

4. Eredmények bemutatása

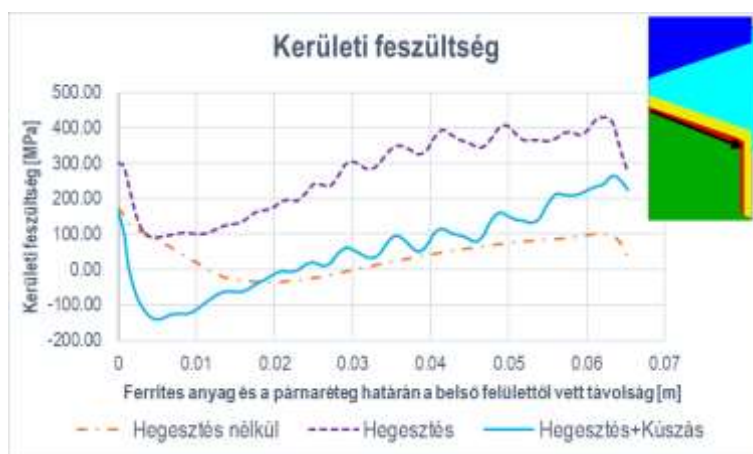
Ennek a tanulmánynak a célja a maradó feszültségek az üzemi terhelésekből származó feszültségekre gyakorolt hatását vizsgálni. A VVER 440 gőzfejlesztőben lévő heterogén varrat a ferrites és ausztenites anyag határánál hajlamos a repedésre, ezért szükséges ennek a területnek a részletes vizsgálata. A következőkben a már bemutatott három analízisből származó eredményeket részletezzük.

Az 5. ábra a végeelem szimulációval meghatározott kerületi feszültségeket ábrázolja. Az ábrából látható, hogy a különböző analízisek esetében keletkezett feszültség állapotok nagymértékben eltérőek. A 6. ábra a ferrites és ausztenites anyag határán a kerületi feszültség eloszlását mutatja be. Látható, hogy az utóhőkezelés alkalmazásával nagy mértékben csökken a keletkező feszültségek nagysága. Az ábrából látható, hogy a varrat belső oldalán a hegesztésnél keletkező maximális érték a hegesztés nélküli esetenél fellépő értékhez közelít.



5. ábra

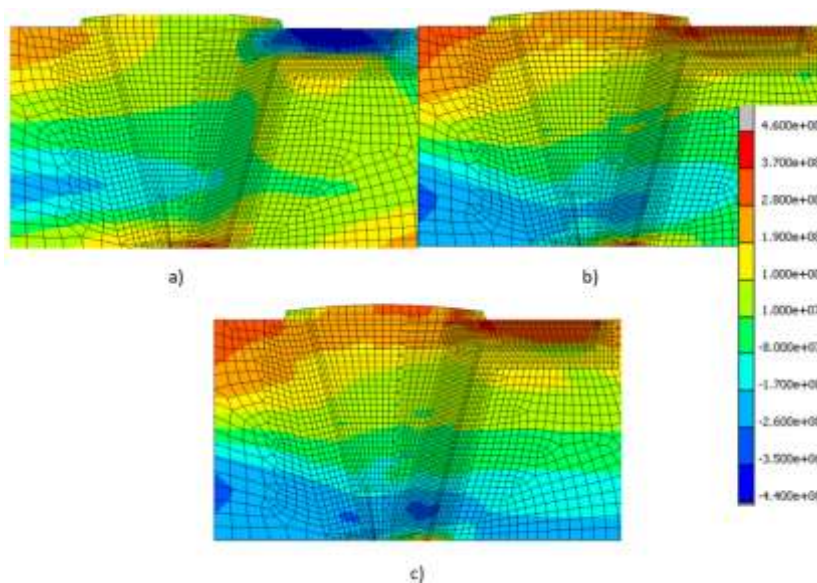
Kerületi feszültségek [Pa] nagysága üzemi terheléseket követően a) hegesztés nélkül, b) hegesztéssel, c) hegesztéssel és kúszással



6. ábra

Kerületi feszültség [MPa] változása a ferrites és ausztenites anyag határán [m]

A 7. ábra az axiális feszültségmezőt mutatja be hegesztés nélküli, hegesztést tartalmazó és hegesztést illetve utóhőkezelést tartalmazó szimulációk esetén. Megfigyelhető, hogy mindhárom mező esetében a belső felületen az első párnaréteg és a ferrites anyag határánál nagy axiális feszültségek keletkeznek, azonban míg a hegesztés nélküli esetben a feszültségek axiális irányúak, vagy nullához közeli nyomóirányúak, addig a hegesztést tartalmazó illetve a hegesztést és utóhőkezelést tartalmazó szimulációk esetében a felülettől távolabb nagy nyomóirányú feszültségek keletkeznek.



7. ábra

Axiális feszültségek [Pa] nagysága üzemi terheléseket követően a) hegesztés nélkül, b) hegesztéssel, c) hegesztéssel és kúszással

A 8. ábra ezen a határ mentén szemlélteti a feszültségek változását. Ez jól alátámasztja a korábbi megállapításokat, mégpedig, hogy a felülethez közel húzófeszültség van jelen, azonban ezt követően nyomófeszültség alakul ki a második két típusú analízis során. Az utóhőkezelés nélküli esetben a maximális axiális feszültség közel 460 MPa, ezzel ellentétben az utóhőkezelés alkalmazással ez a feszültség lecsökkenthető a hegesztés nélküli analízisnél tapasztalt maximális értékre.



8. ábra

Axiális feszültség [MPa] változása a ferrites és ausztenites anyag határán [m]

Ezekből megállapítható, hogy a megfelelő korrozív közeg jelenléte esetén a repedés keletkezéséhez szükséges követelmények rendelkezésre állnak, azonban a repedés terjedése a maradó feszültségek figyelembevételével eltérő lesz, mint amikor ezeket figyelmen kívül hagyjuk. A felülettől távolodva a húzófeszültség nyomófeszültséggé alakul át, ezzel a repedés terjedésének a sebessége lecsökken. Ezek alapján megállapítható, hogy a valós körülmények szimulálásához a maradó feszültségek figyelembevétele szükséges.

5. Összefoglalás

A kutatás során egy VVER-440-es reaktor gőzfejlesztőjénél található heterogén hegesztett kötését vizsgáltuk meg numerikus módszerek segítségével. A szimulációk során figyelembe vettük az anyagok hőmérséklet és fázisfüggő tulajdonságait. Az analízis során az utóhőkezelés hatásának a megállapításához az RCC-MR kúszási modellt alkalmaztuk, amelyhez a szükséges anyagparamétereket a szakirodalomból vettük. Fontos megemlíteni, hogy a kapott eredmények pontosításához, szükséges ezen konstansoknak a kimérése az általunk használt anyagokra.

Az eredményekből megállapítható, hogy korrozív közeg jelenléte mellett feszültségkorróziós repedéshez szükséges húzóirányú feszültségek rendelkezésre állnak. Azonban ha a maradó feszültségeket nem vesszük figyelembe, akkor ennek a repedésnek a terjedése gyorsabbnak feltételezhető az ezen határ mentén kialakult feszültség eloszlás alapján, mivel míg

hegesztés nélküli esetben a feszültségek többnyire húzó irányúak, addig a hegesztés figyelembe vételénél mindkét esetben jelen van egy gyors feszültségváltozás, ahol a húzó irányú feszültségek nyomó irányú feszültségekbe mennek át.

Irodalomjegyzék

- [1] Pingsha Dong, Frederick W. Brust: Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium Review and Beyond, ASME. J. Pressure Vessel Technol. vol. 122(3), 2000, pp. 329–338.
- [2] Wen-Chao Dong, Dian-Bao Gao, Shan-Ping Lu: Numerical Investigation on Residual Stresses of the Safe-End/Nozzle Dissimilar Metal Welded Joint in CAP1400 Nuclear Power Plants, Acta Metallurgica Sinica (English Letters) vol. 32, 2019, pp. 618–628
- [3] Roman Krautschneider, Lukas Joch: Decreasing thermal stresses in steam generator collector weld's area using external cooling, Procedia Materials Science vol. 12, 2016, 12–17
- [4] Lubomír Junek, Ladislav Jurasek, Zdeněk Čančura, Miroslava Ernestová, Zuzana Skoumalová: Degradation Mechanism of Dissimilar Metal Weld Joints on Steam Generator Collectors VVER 440MW Type, Key Engineering Materials vol. 741, Trans Tech Publications, Ltd., 2017, pp. 134–137
- [5] Анализ и исследование характера и причин повреждений сварных соединений №111(ПГВ-1000) и №23(ПГВ-440) Moszka, 2012
- [6] Tae-Kwang Song, Chang-Young Oh, Ji-Soo Kim, Yun-Jae Kim, Kyung-Soo Lee, Chi-YongPark: The safe-end length effect on welding residual stresses in dissimilar metal welds of surge nozzles, Engineering Fracture Mechanics vol.78(9), 2011, pp. 1957-1975
- [7] Stéphan Courtin, Xavier Ficquet, Thi Thuy Trang Lê, Philippe Gilles, Miguel Yescas: Residual Stress Predictions on a 29" Narrow Gap Dissimilar Metal Weld and Comparison With a 14" Configuration, Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 6: Materials and Fabrication, Parts A and B. Toronto, Ontario, Canada. July 15–19, 2012. pp. 1071-1077
- [8] Olivier Doyen, Danièle Ayrault, Alix Bonaventure: Numerical evaluation of the effects of a mitigation treatment on the residual stresses of a tubular dissimilar metal weld, Welding in the World vol. 59(4), 2015, pp. 483-490
- [9] Priyesh Kapadia: Experimental and Numerical Analysis of Creep Cracking under Secondary and Combined Loading, Imperial College, London, 2014
- [10] RCC-MR, Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Island, AFCEN, Paris, Section I - Subsection Z : Technical Appendix A3, 1985

KÜLÖNLEGES ÖTVÖZETEK IPARI ALKALMAZÁSA. HEGESZTÉSI SAJÁTOSSÁGAIK, VALAMINT EZEK SZABVÁNYI HÁTTERE.

STANDARDS BACKGROUND OF THE SPECIAL ALLOYS INDUSTRIAL APPLICATION AND WELDING CHARACTERISTICS

Székely Ferenc

TÜV Rheinland InterCert Kft.,

ferenc.szekely@hu.tuv.com

Az előadás az ipar speciális területén, a vegyiparban, nyomástartó berendezések gyártásához (nyomástartó berendezések, csővezetékek) használatos néhány, különleges, nem vas-alapú ötvözetek (pl. Ni és Co bázisú) alapvető tulajdonságait, valamint hegesztési sajátosságait foglalja össze. Valamint kitér ezen anyagok hegesztéstechnológiájához kapcsolódó szabványokra a nyomástartó berendezések jogilag szabályozott területén.

1. Bevezetés

A vegyiparban, nyomástartó berendezések gyártására (2014/68/EU direktíva szerint) a megszokott egyszerű szénacél (leggyakrabban P265GH) és korrózióálló (1.4301/1.4404) anyagminőségek mellett alkalmaznak néhány nem vasalapú fémötvözetet.

Ezen anyagokra a gyártók saját típust fejlesztettek ki, saját márkanéven hozzák forgalomba, valamint marketing célokból részletesen összegyűjtik és kiexponálják anyaguk pozitív tulajdonságait.

Röviden bemutatásra kerülnek ezen anyagok alapvető tulajdonságai, alkalmazási körülményei, hegesztési sajátosságai és gyakorlati tapasztalatai.

Valamint a hegesztéstechnológia (WPQR) és hegesztő személyzet tanúsításának szabványi háttere.

2. Nikkel-ötvözet: Hastelloy® C-276

2.1 Alapvető tulajdonságok

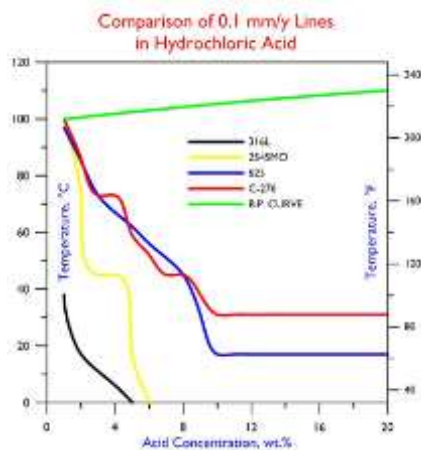
- megnevezés(ek): Alloy C276, Hastelloy® C-276 (Curiosity Rover!), Inconel® C-276,
- vegyjel és anyagszabványok: NiMo16Cr15W (2.4819) – DIN 17744 / VdTÜV 40; UNS N10276; ASTM B622,
- jellemző vegyi összetétel:

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	W	Mo	Co	V	P	S
Min.	51	15	4				3	15				
Max.	63	16.5	7	0.01	1	0.08	4.5	17	2.5	0.3	0.02	0.01

- mechanikai tulajdonságok:

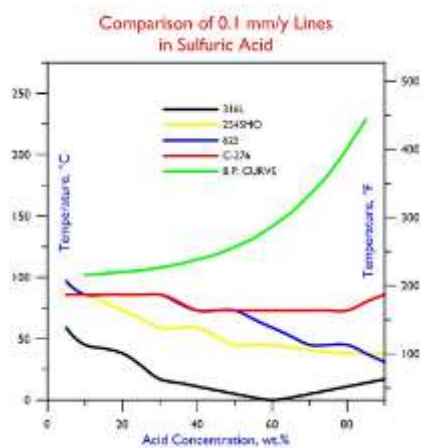
Temperature		Yield strength $R_{p0.2}$		Tensile strength R_m	
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi
20	68	310	45.0	700	101.5
100	212	280	40.6	660	95.7
200	392	240	34.8	630	91.4
300	572	220	31.9	600	87.0
400	752	195	28.3	570	82.7
450	842	150	21.8	530	76.9

- kiváló korróziós ellenállás oxidáló és redukáló közegekkel szemben, különösképpen magas(abb) hőmérsékleten,



1. ábra

Különböző korrózióálló anyagminőségek korróziós fogyásának mértéke a sósavkoncentráció és hőmérsékelt függvényében [1]



2. ábra

Különböző korrózióálló anyagminőségek korróziós fogyásának mértéke a kénsavkoncentráció és hőmérsékelt függvényében [1]

- különösen jó ellenállóképesség erősen oxidáló közegekkel szemben, valamint sók oldatával szemben, mint pl. vas- és réz kloridok,
- a magas nikkel és molibdén tartalom biztosítja a jó korróziós ellenállást redukáló közegekkel szemben,
- alacsony karbontartalom minimalizálja a szemcsehatáron történő karbidkiválást a hegesztés során, így fenntartva a varrat és a hőhatásövezet korrózióval szembeni ellenállását,
- helyi korróziófajtákkal szembeni ellenállóképesség, pl. pitting és feszültségkorrózió,
- azon kevés ötvözetek egyike, amelynek különösen jó az ellenállóképessége a (nedves) klórgázzal, hipoklórossavval, és klórdioxiddal szemben,
- felhasználási terület: reaktorok, hőcserélők, kolonnák, csővezetékek.

2.2 Hegesztési sajátosságai

- hegesztése nem jelent különösebb nehézséget, a TIG eljárással jól hegeszthető,
- előmelegítést, utóhőkezelést nem igényel,
- „matching” hozaganyag (a legtöbb gyártónál rendelkezésre áll)
- kisebb hővezető- és nagyobb hőtágulási képessége, ezt általában nagyobb gyökhézag és leélezési szög alkalmazásával figyelembe kell venni,
- koncentrált hőforrással, alacsony hőbevitellel kell hegeszteni,
- a rétegek közötti hőmérséklet lehetőség szerint ne haladja meg a 120°C-ot, a kiválások miatt,
- fontos a jó gázvédelem, nagy tisztaságú I1 vagy R1 védőgáz és gyökvédelem, ha van rá lehetőség tandem hegesztés,
- csak korrózióálló megmunkáló szerszámok, kefék használhatók

2.3 Hegesztéstechnológia szabványi háttere (a 2014/68/EU direktíva vonatkozásában)

- Hegesztéstechnológia minősítése: EN ISO 15614-1: 2017 – harmonizált szabvány, aktuális

- Hegesztők minősítése: EN ISO 9606-4: 1999 – harmonizált szabvány, elavult; esetleg EN ISO 9606-1: 2017 (FM6) – harmonizált, aktuális, alkalmazása lehetséges.

3. Titán: Titan Gr. 2

3.1 Alapvető tulajdonságok [2]

- megnevezés(ek): Titan Grade 2.
- vegyjel és anyagszabványok: Ti-2 (3.7035); EN harmonizált szabvány hiányzik; számos DIN szabvány a repülés területén; UNS R50400; ASTM B338
- jellemző vegyi összetétel [%]:

Ti: maradék; max. Fe 0,3; C 0,08; O 0,25; H 0,015; N 0,03

- mechanikai tulajdonságok (jellemző értékek):

$R_{p0,2} = 350-450 \text{ MPa}$; $R_m > 485 \text{ MPa}$; $A > 28\%$; HV 160-200; KV = 40-80 J

- egyre gyakoribb az alkalmazása a vegyipari technológiákban („workhorse”),
- kis fajsúlya mellé viszonylag nagy szilárdság és jó megmunkálhatóság és a Ti ötvözetek közül a legnagyobb korrózióállóság párosul,
- tiszta Ti (α), de a kevés oxigén ötvözés a szilárdságot növeli, minden egyéb elem szennyező,
- biokompatibilis, repülés, űrkutatás, offshore,
- kiváló korrózióállóság, akár 500°C-ig,
- a felületén lévő oxidrétegnek köszönhetően jó ellenállóképesség az erősen oxidáló és enyhén redukáló közegekkel szemben: kloridos oldatok, salétrom-, krómsav, szerves savak, tengervíz (300°C-ig), forró gázok,
- feszültségkorrózióval szemben teljesen ellenálló,
- felhasználási terület: hőcserélő berendezések csövei, csővezetékek, szivattyúk, kriogén tartályok.

3.2 Hegesztési sajátosságai [3]

- hegesztés során a felhevült részek a levegőből gázokat nyelnek el (H, N, O), amelyek elridegdedést és porozitást okoznak,
- TIG, (MIG), plazma ívhegesztéssel jól hegeszthető,
- „matching” hozaganyag,
- előmelegítést, utóhőkezelést nem igényel,
- nagy tisztaságot igényel (HF-HNO₃ vagy HCl / 1:10), cérnakesztyű,
- különlegesen tiszta ipari gázok alkalmazása szükséges (Ar+He),
- a felhevült részeket szinte teljes lehűlésig védeni kell: nagyobb méretű gázfúvóka, különböző ernyők, kamrák alkalmazása,
- elszíneződés (skála) mutatja, hogy elégséges volt a gázvédelem: ezüstös, enyhén barnás megfelelő, a sötétkékes elszíneződés bizonyos felhasználási körülményekre még megfelelő, de a világoskék, szürke, esetleg fehér elszíneződés nem megfelelő.

3.3 Hegesztéstechnológia szabványi háttere (a 2014/68/EU direktíva vonatkozásában)

- Hegesztéstechnológia minősítése: EN EN ISO 15614-5: 2004 – harmonizált szabvány, elavult
- Hegesztők minősítése: EN ISO 9606-5: 2000 – harmonizált szabvány, elavult
- prEN 13445-11:2018 (Unfired pressure vessels - Part 11: Additional requirements for pressure vessels of titanium and titanium alloys)

4. Kobalt-ötvözet: ATI L-605™

4.1 Alapvető tulajdonságok [4]

- megnevezés(ek): ATI L-605™, HAYNES® 25, Udimet Alloy L605®, Alloy 25,

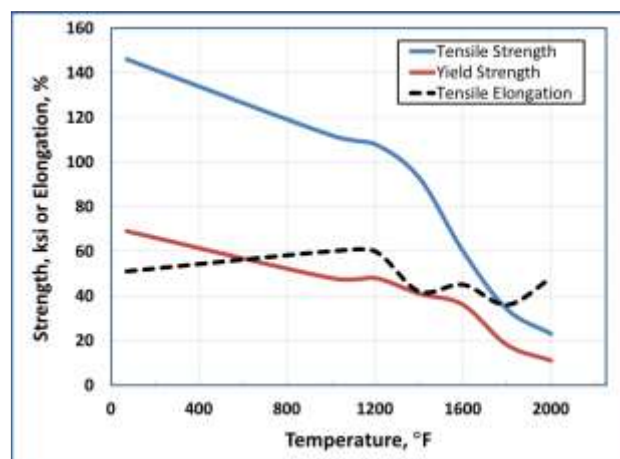
- vegyjel és anyagszabványok: CoCr20W15Ni (2.4964); EN 10302 (nem harmonizált); UNS R30605 ; AMS 5537, ASTM F-90 (orvosi), GE, Rolls Royce

- jellemző vegyi összetétel:

Co: maradék; C 0.05 – 0.15, Mn 1.00 – 2.00, Si max. 0.40, P max. 0.040, S max. 0.030, Cr 19.00 - 21.00, Ni 9.00 - 11.00, W 14.00 – 16.00, Fe max. 3.00,

- mechanikai tulajdonságok (jellemző értékek):

$R_{p0,2} > 517 \text{ MPa}$; $R_m > 1061 \text{ MPa}$; $A > 55\%$



3. ábra

Mechanikai jellemzők a hőmérsékelt függvényében [4]

- rendkívül magas szilárdság (növelt-hőmérsékleten), kúszásállóság, időtartam-szilárdság, a legerősebb az alakítható (kovácsolás) a Co-ötvözetek közül,
- szilárdsága hidegalakítással növelhető ($R_{p0,2} > 760 \text{ MPa}$), de ez a növelt hőmérsékletű tulajdonságait rontja,
- nem mágnesezhető,
- oxidációval és karbonizációval szembeni ellenállás akár 1000°C -ig,
- kénes közegekkel, erős oxidáló és savas közegekkel szembeni ellenállóképesség (nedves klórgáz, salétromsav),

- eróziós-, koptató hatásokkal szemben is ellenálló,
- biokompatibilis (szívbillentyű),
- alkalmazása: robbanó- és égésterek, gázturbina alkatrészek, utánégetők, kemence-technikai alkatrészek, bevonatok, magas hőmérsékleten üzemelő csapágyak és alkatrészeik, rugók, szelepek.

4.2 Hegesztési sajátosságai [4]

- hegesztése nem jelent különösebb nehézséget, ausztenites szövetszerkezete révén, hegesztése megegyezik a Ni-ötvényekkel vagy ausztenites korrózióálló acélokkal,
- TIG és más eljárással jól hegeszthető, fedettívű- és gázhegesztése nem javasolt,
- hegfürdő viselkedése némileg az alumíniuméhoz hasonlít, „megrogyásra”, átrokadásra hajlamos,
- előmelegítést nem igényel, utóhőkezelés, ha szükséges: oldó izzítás,
- „matching” hozaganyag (Corweld),
- minden réz tartalmú anyagot kerülni kell a hegesztése során, melegrepedést okoz,
- koncentrált hőforrással, alacsony hőbevitellel kell hegeszteni,
- a rétegek közti hőmérséklet alacsony legyen ($<100^{\circ}\text{C}$), gyors hűtést igényel, a kedvezőtlen kiválások elkerülése végett,
- fontos a jó gázvédelem, nagy tisztaságú Ar, He,
- csak korrózióálló megmunkáló szerszámok, kefék használhatók.

4.3 Hegesztéstechnológia szabványi háttere (a 2014/68/EU direktíva vonatkozásában)

- Hegesztéstechnológia minősítése: EN ISO – harmonizált szabvány hiányzik,
- Hegesztők minősítése: EN ISO – harmonizált szabvány hiányzik,
- ASME IX (P-No, F-No hiányzik),

- AMS (Aerospace Material Specification), AWS (American Welding Society) specifikációk,
- Gyártói ajánlások,
- Egyéb szabványok: ISO/TR 13393 (Welding consumables — Hardfacing classification — Microstructures), EN 14700 (Welding consumables — Welding consumables for hard-facing).

Irodalomjegyzék

[1] Haynes International

<https://haynesintl.com/>

[2] Hempel Metals

<https://www.hempel-metals.com/>

[3] The Welding Institute

<https://www.twi-global.com/>

[4] ATI metals

<https://www.atimetals.com/>

GLOBALIZÁCIÓ, DIGITALIZÁCIÓ, RONCSOLÁSMENTES ÉRTÉKELÉS

GLOBALIZATION, DIGITALIZATION, NON-DESTRUCTIVE EVALUATION

Dr. Trampus Péter

Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség, 1191 Budapest, Üllői út 206.

trampusp@tarpus.axelero.net

Absztrakt – Az előadás a világban zajló radikális és folyamatos változások, úgymint a globalizáció, a digitalizáció és a technológiai forradalom hatását mutatja be a hegesztett kötések roncsolásmentes vizsgálata / értékelése terén lezajló változásokra. Érinti a következő területeket és gyakorlati példákat mutat be rájuk: vizsgálatok specializációja, roncsolásmentes technikák / eljárások integrációja, vizsgálati érzékenység növekedése, modellezés és szimuláció, 3D vizualizáció, gépi mély tanulás.

Abstract – The presentation describes the impact of the radical and continuous changes world-wide such as globalization, digitalization, technology revolution on the changes in the field of non-destructive testing (NDT) / non-destructive evaluation (NDE) of welded joints. The presentation covers the following areas and gives practical examples for that: specialization of NDT, integration of NDT techniques / procedures, increase of NDT sensitivity, NDT modelling and simulation, 3D visualization, deep machine learning.

1. Bevezetés

A roncsolásmentes vizsgálatok az átlagember számára alig észrevehetőek, viszont az élet szinte minden területén megtalálhatók. Jelentős mértékben járulnak hozzá a társadalom biztonságához, a gazdaság működéséhez, tehát az általános jóléthez. A roncsolásmentes vizsgálatok végzését két cél vezérli. Az egyik az ember és a környezet védelme – ez a „társadalmi” cél. A szerkezet egy roncsolásmentes vizsgálat által fel nem derített eltérés következtében meghibásodhat (eltörhet, leszakadhat), ami veszélyezteti a környezetét. A másik cél a vizsgált szerkezet teljesítőképességének az optimalizálását szolgálja – ez az „üzleti” cél. A két cél gyakran kerül ellentmondásba egymással, és ez nehezíti a roncsolásmentes vizsgálat valódi értékének a megítélését.

Egy hegesztési konferencián úgy fogalmazhatunk, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok célja a hegesztett szerkezetek (elsősorban a hegesztett kötések) használatra alkalmas állapottól való eltérésének a felderítése. Az eltérések lehetnek folytonossági hiányok (összeolvadási hiány, repedés, gázhólyag, zárvány), szövetszerkezeti inhomogenitások (rideg fázisok), vastagság csökkenés, deformáció, stb. Jelen cikkben, a világban az elmúlt évtizedekben lezajlott változásoknak a roncsolásmentes vizsgálatok jelenére és jövőjére gyakorolt hatását elemezzük. Miután a roncsolásmentes vizsgálat evolúciós folyamata már átlépett a hagyományos *Non-Destructive Testing (NDT)* elnevezésű időszakon, és a kvantitatív roncsolásmentes vizsgálat komplexebb, az értékelést is magába foglaló időszakát éljük, amit a *Non-Destructive Evaluation (NDE)* elnevezéssel különböztetünk meg az előzőtől, ezért a cikkben is ez utóbbi elnevezést és rövidítését használjuk.

2. A változó világ

2.1 Globalizáció

A globalizáció átfogó, az élet valamennyi területét érintő változás. A gazdaság, a technika, a pénzügy, a politika és a kultúra területén, az egész világra kiterjedő rendszereket létrehozó folyamatok összessége. A modern kori globalizáció kezdetét a Római Klub 1968-as jelentéséhez lehet kötni, amelyben a Föld sorsáért aggódó tudósok kezdtek el foglalkozni globális környezetvédelmi problémákkal. A globalizáció folyamata a múlt század végén a kommunikáció eszközeinek a fejlődésével vált teljessé. A cikk témaköre – természeténél fogva – a világgazdaság globalizálódásához kapcsolódik.

2.2 Digitalizáció

Kialakult és egyre gyorsuló ütemben fejlődik az információs (azaz a kommunikáció által vezérelt) társadalom. Ennek alapvető lényege, hogy találkozik benne a munkaeszköz (technológia) forradalma a kapcsolatteremtés (kommunikáció) forradalmával. Más szavakkal: nyersanyaga az információ, és a technológia tárgya az információ feldolgozása. Következmenyeként megszűntek a térbeli és időbeli távolságok, átrendeződött az ipar az elektronikai ipar javára, folyamatosan nő a termékek tudástartalma (szoftver / hardver arány egyre magasabb) és kitüntetett szerepet kap az információs technológia (IT) elemeinek magasan integrált rendszerekben történő megjelenése. .

2.3 Technológiai forradalom

Az ipar, pontosabban a technológia forradalma a 18. század végén kezdődött, amikor az emberi erőt felváltották a víz és a gőz energiáját hasznosító gépek, majd a 19. század második felében folytatódott a villamos energia alkalmazásának, illetve a tömeggyártásnak a bevezetésével. A 20. század második fele hozta meg a következő forradalmi változást, amikor is a mikroelektronika és a számítástechnika átvezetett a digitális korszakba és megkezdődött a folyamatok automatizálása. A technológiai forradalom jelenleg zajló, negyedik fázisa (közismert nevén Ipar 4.0) a fizikai és a digitális világ közötti híd (a hálózatot alkotó kiber-fizikai rendszerek) kiépítése és az internet alapú gazdaság megteremtése. A cél egy tökéletesebb tervezés, gyártás, karbantartás, ellenőrzés az adatok (információ) feldolgozása eredményeként, aminek eszköz rendszeréhez olyanok tartoznak, mint a dolgok internete (Internet of Things, IoT), a digitális iker modell, a mesterséges intelligencia, a gépi tanulás, a virtuális valóság stb. Nyilvánvaló, hogy ennek megvalósításához az előzőekben említett folyamatok, különösen a digitalizáció elengedhetetlen.

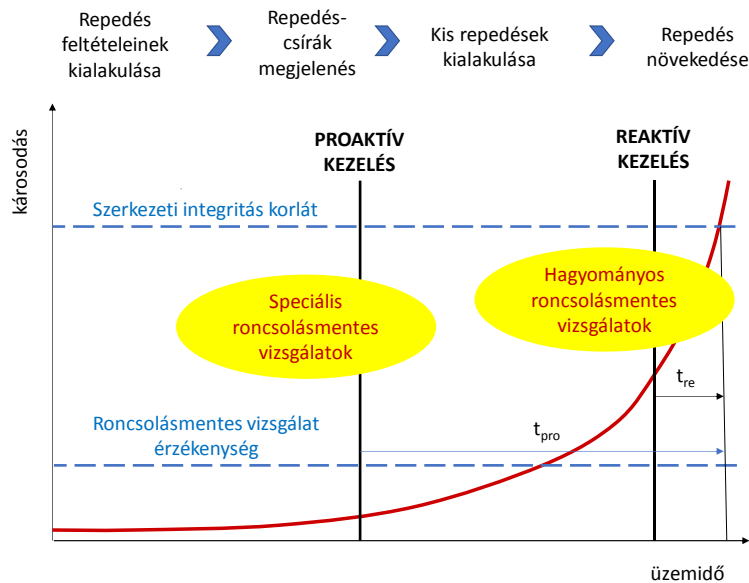
3. A változás hatása a roncsolásmentes értékelésre

3.1 A gyakorlatban már érzékelhető hatások

Az NDE, mint piaci tevékenység évtizedek óta átnyúlik az országhatárokon, azaz globalizálódott. Ennek következménye, hogy a vizsgálatok előírásai, szabványai, irányelvei is nemzetközi dimenziót öltenek. Ezek között vannak európai szintű dokumentumok, pl. Pressure Equipment Directive (PED), European Network of Inspection and Qualification (ENIQ) és vannak adott ipari szektorra vonatkozóak, pl. National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program (NADCAP); sőt vannak és az egész világra kiterjedőek, pl. International Organization for Standardization (ISO), International Atomic Energy Agency (IAEA), International Institute of Welding (IIW) dokumentumok. Jó példa az NDE globalizációjára a vizsgáló személyek képzése, minősítése és tanúsítása. Több évtizedes, összehangolt munka eredményeként ma világszerte egy nemzetközi szabvány fogalmazza meg a minősítés és tanúsítás követelményeit (ISO 9712) és egy másik ad útmutatást az egységes képzési programok kidolgozásához (CEN ISO/TS 25107) [1].

Az IT, a nano- és mikroelektronika fejlődése következtében napjainkban olyan fejlesztő architektúrák vannak, amelyek képesek a különböző technológiák integrálására. Megindult a szoftver és hardver eszközök határának összemosódása a mikroelektronikai eszközök egyre „intelligensebbé” válása következtében és a vékonyréteg technológia fejlődése eredményeként kvantumfizikai hatások is kimérhetők az érzékelőkkel (sensor-on-chip). Példa erre az óriás mágneses ellenállás (giant magneto-resistance, GMR) elvén történő érzékelés az örvényáramos vizsgálatban. Az örvényáramos tekercsek itt kvantumfizikai eszközök, a ferromágneses spin hatásán keresztül igen kis mágneses tér jelenlétét vagy változást óriási mágneses ellenállás változásként érzékelnek [2].

Az egyre érzékenyebb szenzorok kiszolgálják a *károsodás korai detektálása* koncepciót (Proactive Management of Materials Degradation, PMMD). Ennek a lényege, hogy egy repedést nem annak makroszkopikus mértre növekedett szakaszában detektálnak (reaktív viselkedés), hanem azt a lokális környezetet keresik meg, ahol a repedés csírája keletkezni fog (proaktív koncepció) [3]. A hagyományos esetben korlátozott idő (t_{re}) áll rendelkezésre a károsodás detektálását követően a szükséges intézkedés (javítás, csere) előkészítésére és végrehajtására a biztonságos üzemelés folytathatósága érdekében. Ez az időbeli korlát morális nyomást is eredményezhet, ami akár egy rosszul választott intézkedést is vonhat maga után. A károsodás proaktív kezelési módja esetében elhárul az időbeli korlát ($t_{pro} \gg t_{re}$), mert a detektálás a károsodás kezdeti szakaszában, az inkubációs időszak elején történik, 1. ábra. A hagyományos, de egyes esetekben még a korszerű NDE eljárások és technikák is a reaktív megoldást szolgálják. A károsodások proaktív kezelésére speciális NDE eljárások alkalmasak; amelyek kutatására és kifejlesztésére folyamatosan nagy erőfeszítéseket fordítanak.



1. ábra

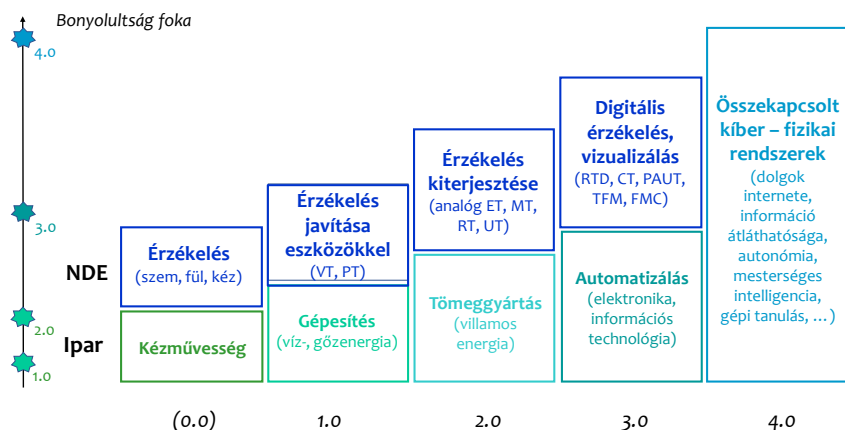
A reaktív és proaktív viselkedés lényege

Nem zárható ki, hogy a jelenlegi gyakorlatunkból ismert NDE-t valamikor fel fogja váltani a szerkezet „globális egészségének” a monitorozása (*Structural Health Monitoring, SHM*). Az SHM legfontosabb jellemzője az, hogy a monitorozó rendszer érzékelőit (optikai, akusztikus, elektromágneses, stb.) beágyazzák a szerkezet kritikus pozícióiba, így azok a tényleges üzemi és üzemzavari terhelés állapotában gyűjtik az adatokat, és továbbítják azokat folyamatosan az adatfeldolgozó rendszer felé. A rendszer a szerkezet állapotának (Health) értékeléséhez a számára megtanítottak alapján felismeri a károsodási folyamatot, meghatározza a károsodás helyét, fokát, majd ezekből az információkból előrejelzést ad a szerkezet jövőjére nézve. Az SHM rendszer legfontosabb elemei az érzékelők, a vezeték nélküli adatforgalom és a károsodási algoritmusok (mesterséges intelligencia) [4].

Egyre fontosabb helyet foglal el az NDE területén a *numerikus szimuláció*, elsősorban azokban az iparágakban, amelyek igényes vizsgálati eljárásokkal dolgoznak (pl. repülőgépgyártás, közlekedés, energiaipar). Ma már olyan integrált modellekkel történik a szimuláció, ami CAD tervezésű, komplex geometriát és inhomogén szerkezeti anyagot vesz figyelembe és közvetlenül kapcsolódik az NDE céljainak megfelelő interfészhez. A korszerű szimuláció kiterjed az ultrahangos (beleértve a vezetett hullámokat is), az örvényáramos és a radiográfiai eljárásra; továbbá kezeli a hanghullám és a folytonossági hiány (repedés) kölcsönhatását. Ez teljes mértékben megfelel az ipari igényeknek, úgy a reprezentativitás, mint a gyorsaság és egyszerűség tekintetében. Egyre szélesedő alkalmazási területéhez tartozik a detektált hiányok értelmezése, az NDE rendszerek minősítése, a képzés és vizsgáztatás és a POD görbék generálása [5].

3.2 Paradigmaváltás – az NDE jövője

Az *Ipar 4.0* teljesen új alapra helyezi a folyamatokat, és természetesen új utat jelöl ki az NDE számára is. Az új út nem lehetőség, hanem a helyzetből adódó szükségszerűség. A 2. ábra az Ipar 4.0 és az NDE 4.0 fejlődési folyamatát mutatja (vigyázat: az egyes fázisokhoz nem ugyanaz az időskála tartozik). A vázolt koncepció szerint a negyedik forradalomban megtörténik a két terület összeolvadása, pontosabban fogalmazva az NDE beintegrálódik a technológia (általános) forradalma eredményeként kialakuló világba [6].



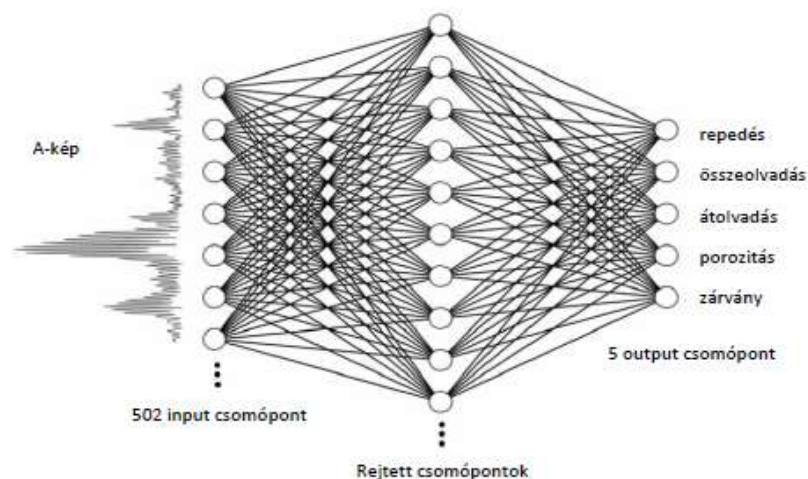
2. ábra

Az Ipar 4.0 és az NDE 4.0 kapcsolata [6]

Az Ipar 4.0 – ahogy korábban már leírtuk – lényegében a meglévő elemek fejlett hálózatának kialakítása a digitális kor eszközeivel, a folyamatban képződő információk felhasználásával a jövő piaci igényeinek a kielégítésére. Fontos rögzíteni, hogy a jövő piaci igényei nem azonosak a jelenével. Elég, ha csak az additív gyártásra gondolunk, amelynek eredménye „egyedi tömeggyártás” is lehet. Ezt a világot kell kiszolgálnia az NDE-nek.

Ha az Ipar 4.0 irányából nézzük a jövőt, akkor megállapíthatjuk, hogy az NDE lehetőséget kapott a vezető technológiáknak, azaz a technológiai forradalom vívmányainak az alkalmazására. Ennek az eredményei beépülnek az NDE technikai megoldásaiba és technológiáiba (pl. robotizáció, különös tekintettel a drónok használatára) vagy az adatfeldolgozásba és értékelésbe (pl. gépi tanulás). A technológiai feltételek lehetőséget teremtenek az NDE adatok statisztikai feldolgozására, egyebek mellett a vizsgálat megbízhatósága, a vizsgálat teljesítőképessége, az eredmények konzisztenciája, a vizsgálatok kompetenciája és végső soron az ellenőrzés / vizsgálat értéke terén. Ha az NDE 4.0 irányából nézzük, akkor meggyőződéssel kijelenthetjük, hogy a vizsgálatok szállítják az Ipar 4.0 számára az egyik legnagyobb tömegű és legértékesebb információt. Ehhez szükség van az IoT-be történő integrációra, az adatok átláthatóságának biztosítására, illetve olyan további eszközök használatára, mint a digitális iker vagy a párhuzamosítás (thread).

Törvényszerű volt, hogy a *gépi tanulás* alkalmazásának lehetősége megjelent az anyagtudományban is [7]. Így nem meglepő, hogy az NDE is megtalálta hozzá az utat. Az eljárás lényege egy automatikus tanulás egy adatbázis tapasztalataiból, megfigyeléseiből és különböző mintázatok elemzéséből, előzetes programozás nélkül. Ehhez számítási kapacitás, algoritmus és nagy mennyiségű adat kell. NDE esetében az utóbbi általában hiányzik, mert – szerencsére – nem detektálunk tömegesen folytonossági hiányokat. Ezért a szerény folytonossági hiány populációt virtuális úton felduzzasztjuk. Ha már rendelkezésre áll a nagy adatmennyiség, akkor megfelelő algoritmussal (mesterséges intelligencia) megoldható a vizsgálati feladat. A 3. ábra egy egyszerű (impulzus-visszhang) ultrahangos vizsgálat A-képe elemzésének az elvi sémáját mutatja [8].

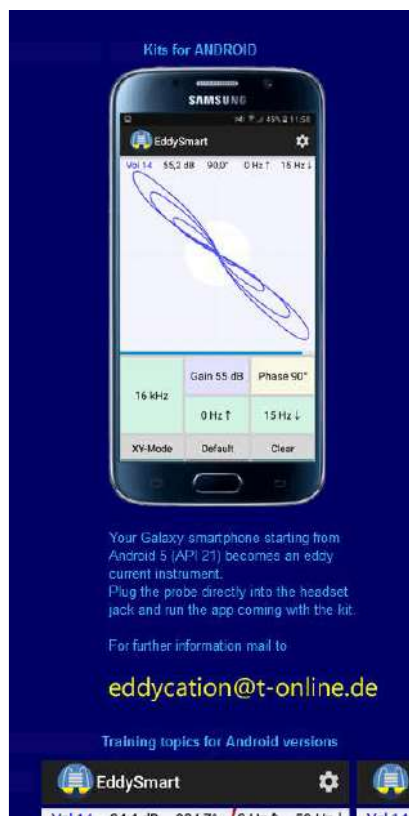


3. ábra

Ultrahangos indikáció értelmezése gépi tanulással

A nem túl távoli jövő képébe tartozik a *távolsági NDE* (remote NDE). Ez azt jelenti, hogy a vizsgálatot egy operátor vagy egy robot végzi és az értékelésért felelős szakértő a világ egy másik pontján található. A kommunikáció eszköze az internet.

Egy további lépés az „*NDE mindenkinek*” koncepció megvalósítása. Az okostelefonok magasan integrált eszközök, amelyek számítógépet, kamerát, szenzorokat (pl. GPS), hőmérőt, gyorsulásmérőt, mikrofont, Bluetooth-t, WiFi-t és egyebeket tartalmaznak. Már ma is alkalmasak például a használója egészségi állapotának a diagnosztizálásra (pulzusszám, vérnyomás, zsírtartalom stb.). Ebből logikusan adódik, hogy az okostelefonok a szerkezetek állapotának a diagnosztizálása is alkalmazhatók. Már több kutató helyen fejlesztettek ki olyan alkalmazásokat, amelyek örvényáramos, ultrahangos, infravörös termográfiai vagy egyéb eljárásokkal, NDE feladatok elvégzésére is alkalmassá váltak. A 4. ábra példaként egy örvényáramos alkalmazást mutat, amit egy német egyetemen fejlesztettek ki [9]. Természetesen az örvényáramos vizsgáló szondát csatlakoztatni kell a telefonhoz.



4. ábra

NDE alkalmazás okostelefonon

4. Összefoglalás

A világban végbemenő és azt formáló változások jelentős hatással vannak az NDE-re. A változások fő irányát és tartalmát az Ipar 4.0 és az NDE 4.0 folyamatok harmonizációja határozza meg. Egyrészt a digitalizáció minden eleme alkalmazásra kerül az NDE közeli és távoli jövőjében. Ilyenek, mint a modellezés és szimuláció, a valós idejű ellenőrzés, az internet használat, az IoT, a gépi tanulás, a virtuális iker, a távoli NDE, hétköznapi alkalmazást nyernek. Előnyös tulajdonságaik lehetőséget teremtenek a primer NDE adatok széleskörű feldolgozására, ami hozzájárul a vizsgálat megbízhatóságának, a vizsgálat teljesítőképességének, a vizsgálati eredmények konzisztenciájának a növeléséhez. Az adatokból következtetéseket vonhatunk le a vizsgálok kompetenciájára nézve is, és – összességében – reálisabban jelenik meg előttünk az NDE valódi értéke. A digitalizáció elemeinek a magasan integrált hálózatokká építése és a hálózatok alkalmazása jelenti a negyedik technológiai forradalom lényegét. Meggyőződésünk, hogy ez az út oda vezet, hogy az NDE az Ipar 4.0 számára korábban elképzelhetetlen mennyiségű és értékű információt fog szolgáltatni.

Irodalomjegyzék

- [1] Trampus Péter: A roncsolásmentes vizsgálok képzése – kitekintés a világba, Anyagvizsgálók Lapja, 2021/I. (megjelenés alatt)
- [2] Harry I. Ringermacher: NDE: Surfing the electromagnetic spectrum, Proc. 18th WCNDT, Durban, South Africa, 2012.
- [3] Leonard J. Bond: Moving Beyond Nondestructive Examination to Proactive Management of Materials Degradation, J. Pressure Vessel Technology, February 2012, Vol 134.
- [4] C. R. Farrar, K. Worden: An introduction to structural health monitoring, Phil. Trans. R. Soc. A, 2006, 365, pp. 303-315

- [5] Perre Calmon et al: CIVA: An Expertise Platform for Simulation and Processing NDT Data, Ultrasonics, 44, 2006, pp.e975-e979
- [6] Johannes Vrana: ZfP 4.0: Die vierte Revolution der Zerstörungsfreien Prüfung: Schnittstellen, Vernetzung, Feedback, neue Märkte und Einbindung in die Digitale Fabrik, ZfP Zeitung, 165, Juli 2019, pp. 51-59
- [7] Jing Wei et al: Machine learning in materials science, InfoMat, 2019, I, pp. 338-358.
- [8] Iikka Virkkunen: Automated Flaw Detection Using Machine Learning (ML), 2020, webinar, asnt.org/learn
- [9] Norbert Meyendorf: Next Generation NDT, NDT for Industry 4.0, and NDE for Everyone, 2020 webinar, asnt.org/learn