



# XXXI. Nemzetközi Hegesztési

## Konferencia

2022. május 19-21. Kecskemét



**NJE** Neumann  
János  
Egyetem





## **XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia**

**2022. május 19-21.**

Szerkesztette: Dr. Gáti József

Nyomdai előkészítés: Kuti János, Dr. Gáspár Marcell

Felelős kiadó: Magyar Hegesztési Egyesület  
Dr. Gáti József elnök

ISBN 978-615-6260-01-7

# BIZOTTSÁGOK

## A KONFERENCIA FŐVÉDNÖKE

Dr. Palkovics László akadémikus, Innovációs és Technológiai Miniszter

## A KONFERENCIA ELNÖKE

Dr. Gáti József, a MAHEG elnöke

## A KONFERENCIA TÁRSELNÖKEI

Gayer Béla, az MHE igazgatója  
Prof. Dr. Trampus Péter, a MAROVISZ elnöke  
Dr. Bíró Gyöngyvér, a MAE elnöke

## PROGRAMBIZOTTSÁG

Elnök: Gyura László, a MAHEG főtitkára

Tagjai:

Dr. Weltsch Zoltán	Dr. Farkas Attila
Dr. Gáspár Marcell	Dr. Palotás Béla
Dr. Gáti József	Dr. Májlinger Kornél
Prof. Dr. Jármái Károly	Prof. Dr. Réger Mihály
Dr. Fábíán Enikő Réka	Dr. Kovács Tünde Anna
Illyi János	Bakos Levente

## TECHNIKAI és SZERVEZŐBIZOTTSÁG

Elnök: Dr. Farkas Attila

Társelnök: Kuti János

Tagjai:

Hareancz Ferenc  
Radics Renáta  
Kiss Alexandra

## TÁMOGATÓK

### A KONFERENCIA FŐ TÁMOGATÓI



### A KONFERENCIA KIEMELT TÁMOGATÓI



# FROWELD

### A KONFERENCIA TÁMOGATÓI



## ELNÖKI KÖSZÖNTŐ



Tisztelettel köszöntöm a XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia valamennyi résztvevőjét!

Konferenciánk a 2022. esztendő kiemelkedő hazai szakmai programja, mely széles szakmai együttműködés mellett – a Magyar Hegesztéstechnikai és Anyagvizsgálati Egyesülés, a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség, a Magyar Acélszerkezeti Szövetség és a Neumann János Egyetem közreműködésével – kerül lebonyolításra Kecskeméten, immár újra személyes megjelenés mellett.

A kétévente megrendezésre kerülő rendezvénysorozat idei állomásán a „kötés-, a termikus és vízsugaras vágás -technológiák korszerű anyagai és eljárásai az IPAR 4.0 tükrében” témakört helyeztük a konferencia tematikájának középpontjába. A résztvevőknek lehetőségük nyílik a plenáris előadások során betekintést nyerni a gazdaság szakterületünkhöz kapcsolódó aktuális témaköreibe, és megismerni a legfrissebb szakmai információkat a szekcióülések, bemutatók során. Valamennyi elhangzó előadás ISBN számmal ellátott online kiadványban kerül publikálásra.

Ezúton is köszönöm mindazon kollégák kitartó munkáját, akik tevékenységükkel hozzájárultak a konferencia megszervezéséhez, előkészítéséhez. Köszönöm az előadások szerzői, a szekciók elnökei felkészülését, a társszervezetek, a Programbizottság, a Technikai és Szervezőbizottság tagjainak odaadó gondoskodását, és nem utolsósorban a házigazda Neumann János Egyetemnek a méltó feltételek biztosítását, munkatársainak közreműködését.

A 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. Egyben lehetőség nyílik arra is, hogy átadásra kerüljenek a Rittinger János Szakdolgozat pályázat legkiválóbb ifjú díjazottjai részére a nyeremények, valamint számukra, és a Tudományos Diákköri Konferenciák nyertesei részére – VIP részvétel mellett – lehetőséget biztosítsunk a kutatási eredményeik bemutatására is.

A személyes részvétel mellett zajló tanácskozás – az előadások követése mellett – lehetőséget biztosít a kötetlen szakmai és baráti beszélgetésekre, új együttműködések, szakmai kapcsolatok kialakítására, valamint a régió gazdasági szereplőinek megismerésére.

Végezetül kívánok a XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia valamennyi résztvevőjének sikeres szakmai tanácskozást, ismereteik, szakmai és baráti kapcsolataik bővítését, és nem utolsósorban a megszerzett tudás hasznosítását mindennapi munkájuk során!

Budapest, 2022. április 21.

Dr. Gáti József  
a Konferencia elnöke

# TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	6
Lézersugaras vágási technológiák az anyagminőségek tükrében .....	8
Measurement of the surface hardness of titanium alloy samples produced by additive manufacturing .....	17
Autóipari DP acél finomlemezek lézersugaras hegesztése és utókezelése.....	31
Lézersugaras hegesztési folyamatparaméterek hatásának vizsgálata acéllemezek tompahegesztése esetében.....	38
Lángvágás hatása növelt szilárdságú acéllemezek mechanikai és mikroszerkezeti jellemzőire .....	43
S1300 nagyszilárdságú szerkezeti acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése .....	48
A kavaró dörzshegesztés szerszámkialakításának kísérleti úton történő vizsgálata.....	57
Az 1.4404-es acél dióda lézeres hegesztése.....	76
Automatizálás jövőbe mutató fejlesztései – piaci versenyelőnyök.....	84
Nagyszilárdságú acélok előmelegítési hőmérsékletének ellenőrzése.....	98
Minőségbiztosítás a hegesztett szerkezetek gyártásában Lean rendszer, Hat szigma, 5S módszer, Toyota módszer.....	109
Ellenállás-ponthegesztési technológia fejlesztése ultra-nagyszilárdságú acélokhoz .....	113
Nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett szerkezetek kritikus varratinak utókezelési lehetőségei .....	124
Hegesztési biztonsági zónák kialakítása automatizált gyártás esetén .....	125
Ellenállás-mikorhegesztés lehetőségei HWH-iSpotHFG nagyfrekvenciás hegesztőrendszerrel.....	130
Auszténites és duplex rozsdamentes acélok vegyes kötéseinek mikroszerkezeti és korróziós tulajdonságai .....	136

## TABLE OF CONTENTS

TABLE OF contents .....	7
Laser cutting technologies in regards of the material.....	8
Measurement of the surface hardness of titanium alloy samples produced by additive manufacturing .....	17
Investigations on the dissimilar joining - Al2024 rivet with a PEI polymer .....	25
Laser beam welding and post-weld heat treatment of automotive DP steel sheets.....	31
Investigation of the effect of laser beam welding process parameters on the butt welding of steel plates .....	38
Effect of flame cutting on mechanical and microstructural properties of high strength steel plates ..	43
Gas metal arc welding of S1300 high strength structural steel .....	48
Experimental testing of friction welding tools .....	57
Diode laser welding of 1.4404 steel .....	76
Future developments in automation – competitive advantages in the market .....	84
Preheating temperature testing on HSS.....	98
Quality assurance in the fabrication of welded structures .....	109
Development of resistance spot welding technology on ultra-high strength steel sheets .....	113
Possibilities of post-treatments on critical joints of welded structures made of high strength steels .....	124
Establishment of welding safety zones for automated manufacturing .....	125
RESISTANCE MICRO WELDING OPTIONS by HWH-iSpotHFG high-frequency welding system.....	130
Microstructure and corrosion properties of austenitic and duplex stainless dissimilar joints.....	136

# LÉZERSUGARAS VÁGÁSI TECHNOLÓGIÁK AZ ANYAGMINŐSÉGEK TÜKRÉBEN

## LASER CUTTING TECHNOLOGIES IN REGARDS OF THE MATERIAL

**Czigány Bence**

ÓBUDAI EGYETEM

Bánki Donát Gépész és  
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,  
czbence997@gmail.com

**Fábián Enikő Réka**

ÓBUDAI EGYETEM

Bánki Donát Gépész és  
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,  
fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

*Kísérleti úton vizsgáltuk a fény és anyag kölcsönhatását lézersugaras megmunkáláskor. Különös hangsúlyt kaptak a nehezen vágható, erős reflexiójú vagy vastag fémlamezek anyagokhoz szükséges vágási paraméterek meghatározására. Szemrevételezés mellett metallográfiai vizsgálatok alapján minősítettük a létrehozott vágásokat. A vágási rések vizsgálásával meghatároztuk, hogy mely paraméterek együttese alkották az optimális megmunkálást.*

*In this work the interaction between laser and material under laser cutting was investigated. There was special emphasis on determining the cutting parameters required for high reflexivity or thick metal sheets. In addition to visual inspection, metallographic studies were used to qualify the cutting gaps produced. By examining the kerf, there were determined the combination of parameters that gives the optimum laser cutting.*

## 1. Bevezetés

A LASER betűszó magyar megfelelője fényerősítés a sugárzás kényszerített emissziójával. A lézersugaras vágás koncentrált energia bevitellel dolgozik, így jól alkalmazható nagy hővezetésű fémek vágásánál is. A vágást nehezítő legfőbb tényező a felület reflexiója. Kísérleteinknél lézersugárral az átlagosnál nehezebben megmunkálható sárgaréz, alumínium, vastag korrózióálló acéllemez és vastag szerkezeti acéllemez vágási paramétereit vizsgáltuk. Az általunk változtatott paraméterek közé tartoztak a teljesítmény, frekvencia, előtolási sebesség, fókusztáv, fúvóka, optika, munkagáz és annak nyomása. A kísérletek célja az említett paraméterek legjobb összkombinációjának elérése volt az optimális vágás eléréséhez adott anyagminőségeknél adott vastagságoknál. A kísérletet Trumpf TLF 5000 turbo típusú anyagmegmunkáló gépen készült.

## 2. Lézersugár és az anyag kölcsönhatása lézersugaras vágáskor

A fény és az anyag sokféle képpen léphet kölcsönhatásba egymással. A kölcsönhatás milyenségét a fény és anyag tulajdonságai határozzák meg. Ezek a tulajdonságok a hullámhossz, intenzitás, abszorpció, anyagvastagság és az optika. A következőkben részletesen elemezzük ezeket a paramétereket

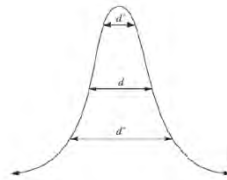
### 2.1 Lézer tényezői

A lézerhez köthető tényezők a hullámhossz, impulzus hossza, impulzusonkénti energia, ismétlés sebessége és a sugár alakja. A lézer hullámhossza szabja meg a foton energiáját. Minél rövidebb a hullámhossz annál nagyobb ez az energia. A rövidebb hullámhosszú lézereket részesítjük előnyben a nagy amplitúdóval szemben.

A következő szempont az impulzus energiája. Az impulzusonkénti energiának elég magasnak kell lennie ahhoz, hogy az ablációs folyamatot elindítsa. Fontos továbbá az impulzus hossza. Rövid impulzusok eredményezik a legmagasabb energia



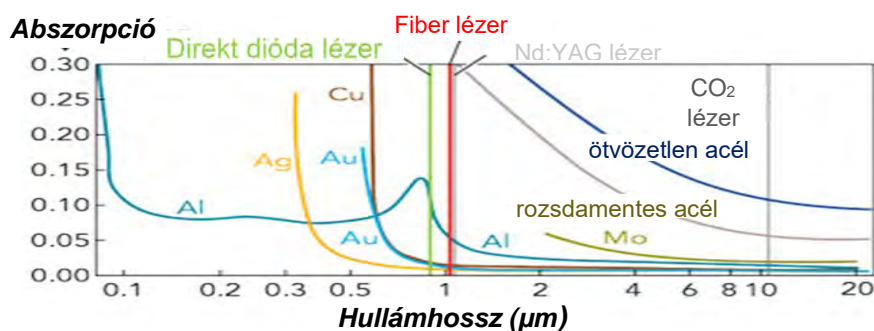
intenzitást. Minél rövidebb az impulzushossz, annál valószínűbb, hogy a foton energiája az anyag eltávolítására használódik fel és nem hőbevitelre. Az impulzus ismétlési sebessége meghatározó. Megmunkáláskor a kilépő anyagnak időre van szüksége, hogy elhagyja az anyagot. Túl rövid időközönként érkező impulzusok gátolják ezt a folyamatot. Az ismétlés sebességét a meghertz tartomány alatt érdemes tartani. Végül maradt a sugár alakja, mint tényező. Az elvárás, ami legtöbbször nem teljesül, egy lapos hegyű sugár. Tudni illik a legtöbb sugár Gauss profilú (1. ábra). A lézerfolt méretének/értékének megadása Gauss teljes szélesség a maximum felénél (félérték-szélesség) történik. Az anyag felületén vágáskor/fúráskor/lyukasztáskor a keletkező átmérő hasonló, de nem megegyező értékű lesz.



1. ábra.  
Gauss lézersugár profil

## 2.2 Az anyag tényezői

Az abszorpciós képesség az anyag legfontosabb tulajdonsága mikor lézeres anyagmegmunkálásról beszélünk. Minél jobb az abszorpciós képesség annál jobban tudja a foton átadni az energiáját anyag eltávolításakor és annál kevesebb vesz el hődisszipáció révén. Ez a tényező nem változtatható, hiszen alapvető tulajdonsága az anyagnak hullámhossz tekintetében. Az anyag fényvisszaverő és abszorpciós képessége az optikai állandók vagy a komplex törésmutató méréseiből számolható ki. A (2. ábra) néhány gyakori fémes anyag reflexiós képességét mutatja meg hullámhossz függvényében.



2. ábra.  
Abszorpciós képesség hullámhossz függvényében

Az ábráról leolvasható az elterjedt lézerek hullámhosszai. Amint az ábrán látható, az anyag fényvisszaverő képessége rendszerint nő a hullámhossz növekedésével. A fényvisszaverő képesség (és így az abszorpciós képesség) ilyen hullámhosszfüggése azonban csak iránymutatásként használható, mivel számos más tényező is erősen befolyásolja az abszorpciós képességet. Például egy anyag fényvisszaverő képessége általában csökken a hőmérséklet növekedésével. Következésképpen egy alacsony hőmérsékleten erősen fényvisszaverő anyag erősen abszorbenssé válhat magas hőmérsékleten. Ez különösen fontos az anyagok lézeres megmunkálása során, ahol a lézer és az anyag kölcsönhatása a felületi hőmérséklet nagyfokú növekedéséhez vezet. Az abszorpciós képességet befolyásoló paraméterek közé tartozik még a sugár beesési szöge és az anyag felületi tulajdonságai. Fontos a kötések szerkezete is. A polimerek  $\pi$  elektron felhővel jól elnyelik az UV sugárzást, míg a fémek abszorpciós képessége elmarad ettől. A hővezető képesség az anyag egy másik meghatározó paramétere. Amennyiben hőt generálunk az anyag hővezető képessége befolyásolni fogja a vágás peremfelületeit és a hőhatásövezet nagyságát [1] [2]. Az anyag minőség rendkívül befolyásolja a lézerfény elnyelődését, a lemezvastagság pedig a vágási sebességet [3]

## 3. CO<sub>2</sub> lézer

Az anyagmegmunkálásban az összes között talán a CO<sub>2</sub> lézer a legismertebb. Molekuláris besorolású, aktív médiumként széndioxidot használ. A széndioxid molekula három rezgésosztályra képes. A szimmetrikus és aszimmetrikus rezgések mellett a molekula forgásra is képes. A forgó mozgásból adódó energia a rezgéshez képest elenyésző. A gerjesztett széndioxid molekula egy vagy több energia szintbe is besorolható. A folyamat a nitrogén molekulák rezegtető gerjesztésével kezdődik, amit elektromos kisülésekkel idézünk elő. A gerjesztett nitrogén vibrációs szintjei metastabilis állapotúak. A nitrogén molekula

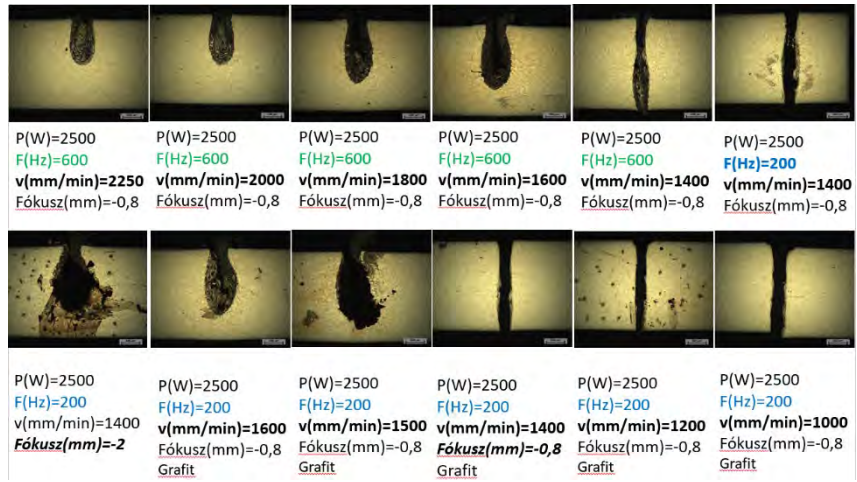
ütközési energián keresztül a széndioxidot gerjesztett állapotba hozza. A lézeres átmenet a kezdő szint (001) és a végső szint (100)-(020) között megy végbe 10.6 és 9.6 $\mu$ m lézersugárzást produkálva. Mindkét amplitúdó lézersugárzás elmarad a legerősebb és a leggyakrabban használt 10.6 $\mu$ m sugárzáshoz képest. A praktikus széndioxid lézer (CO<sub>2</sub>) nitrogén és hélium keverékét használja. A hozzáadott hélium növeli a kimenő energiát. Ezeknek a lézereknek a tulajdonságát többnyire a zárt kisülősőben áramló gáz határozza meg, ami közül a tengelyirányú és keresztirányú típus a legsűrűbben alkalmazott megoldás. A széndioxid lézer lehet állandó és impulzus üzemi is [4] [5].

#### 4. Vágási kísérlet sárgaréz lemezen

A kísérletet azonos anyagösszetételű, de két különböző anyagvastagságú munkadarabon végeztük. A szakirodalom szerint a maximális vágási sebesség akkor érhető el, ha a sugár fókuszálva vékony lemezek esetében a lemez felületén, vastag lemezek esetében pedig a lemeztvastagság körülbelül egyharmadával a felület alatt helyezkedik el [6]. Munkagázként nitrogént használtunk. Elsőnek a 2,5 mm vastag lemez került elemzésre. A lemezen különböző frekvencia beállításokkal és különböző vágási sebességekkel végeztünk kísérleteket. Összesen 12 vágási kísérlet készült. A 3. ábra tanúsága szerint csak 1,4 m/perces sebesség mellett sikerült teljes átvágást elérni. Sikertelen vágásnál az olvadék visszaverődött a munkadarab felszínére. A megmunkálási sebesség paraméterének csökkentése vágásról vágásra egyre mélyebb vágást idézett elő az anyagban. A sikertelen vágások kiváltó oka a sárgaréz anyag jó infravörös lézertény (IR) visszaverő képessége és technológiához képest nagy anyagvastagság. Az anyag rossz abszorpciós képessége és a gyors megmunkálási sebesség nem tette lehetővé, hogy a vágási keresztmetszet kellően átolvadjon. Grafitrafújással a felületre és a megmunkálási sebesség 1400 mm/min-re való csökkentésével tudtunk sikeres vágást tenni. A sebesség további csökkentésével megnőtt a résméret, ami megmunkálás szempontjából kedvezőtlen. A frekvencia csökkentése észlelhető különbséget nem eredményezett.

1. táblázat: 2.5 mm vastagságú sárgaréz lemez vágási adatai

Vágási szám	f (Hz)	v (mm/min)	Fókusz (mm)	Grafit	Kimenetel
1	600	2250	-0.8		sikertelen
2	600	2000	-0.8		sikertelen
3	600	1800	-0.8		sikertelen
4	600	1600	-0.8		sikertelen
5	600	1400	-0.8		részleges áthatolás
6	200	1400	-0.8		részleges áthatolás
7	200	1400	-2		sikertelen
8	200	1400	-0.8	hozzáadva	sikeres
9	200	1600	-0.8	hozzáadva	sikertelen
10	200	1200	-0.8	hozzáadva	sikeres
11	200	1500	-0.8	hozzáadva	sikertelen
12	200	1000	-0.8	hozzáadva	sikeres

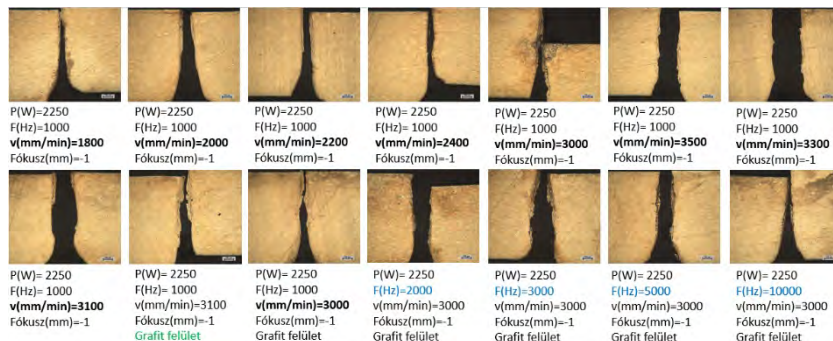


3. ábra. 2.5mm vastagságú sárgaréz lemez vágásainak keresztmetszeti képe paraméterváltoztatások tükrében

A kísérletet 1 mm vastagságú sárgaréz lemez vágásával folytattuk. Fókuszfoltot a lemez aljáig töltük. Előbb a állandó frekvencián a sebességet módosítottuk, majd a sikeres legnagyobb sebesség mellett a frekvenciát emeltük (2. táblázat) Ennél a kísérlet sorozatnál 1000 Hz-es frekvencián és 1,8- 3 m/ perces előtolással sikerült teljesen átmenő vágásokat készíteni, e fölött a vágási sebesség fölött a megömlött anyag részben a lemez felületen torlódott (4. ábra). Grafitos befúvás nem változtatott az eredményen, viszont megjegyzendő, hogy a fény abszorpcióját segítette a felület láthatóan oxidos mivolta. Meghatározó kúposág jelensége a kimeneti oldalt mindegyik vágásnál fellelhető.

2. táblázat:1 mm vastagságú sárgaréz lemez vágási adatai

Vágási szám	Fókusz (mm)	f (Hz)	v (mm/min)	Grafit	Kimenetel
13	-1	1000	1800		sikeres
14	-1	1000	2000		sikeres
15	-1	1000	2200		sikeres
16	-1	1000	2400		sikeres
17	-1	1000	3000		sikeres
18	-1	1000	3500		részleges áthatolás
19	-1	1000	3300		részleges áthatolás
20	-1	1000	3100		részleges áthatolás
21	-1	1000	3100	hozzáadva	részleges áthatolás
22	-1	1000	3000	hozzáadva	sikeres
23	-1	2000	3000	hozzáadva	részleges áthatolás
24	-1	3000	3000	hozzáadva	sikeres
25	-1	5000	3000	hozzáadva	sikeres
26	-1	10000	3000	hozzáadva	sikeres



4. ábra. 2.5mm vastagságú sárgaréz lemez összes vágásának keresztmetszeti képe paraméterváltoztatások tükrében 36x nagyításban.

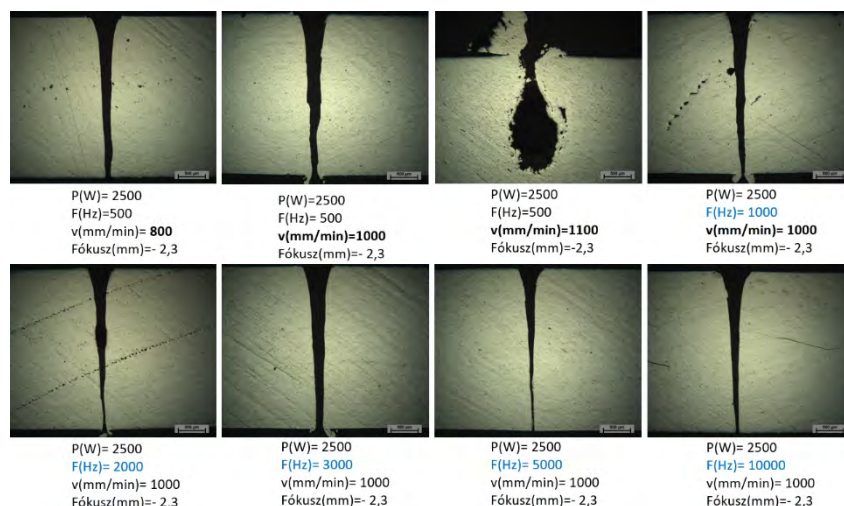
## 5. Vágási kísérlet alumínium lemezen

Irodalmi adatok alapján [7] duralumínium ötvözet CO<sub>2</sub> gázlézerrel való vágásakor a vágási rés és a szakállasság argon gáz alkalmazása mellett a legkisebb, de megfelelő eredményt mutat a nitrogén is. A két gáz árában jelentős különbség van a nitrogén javára [8], ezért kísérleteinket nitrogén gáz alkalmazásával végeztük, mivel az ipari hasznosíthatóságot a gazdaságosság jelentősen befolyásolja. A lézerteljesítmény megválasztásakor irodalomban fellelhető adatokra támaszkodtunk. Riverio és társai [9] úgy találták, hogy 2024 minőségű alumínium ötvözetből készült, 3 mm vastagságú lemez CO<sub>2</sub> lézer-es berendezéssel való vágásakor a vágási élék felületi érdességében a legkisebb értékek, 2500 W-os teljesítményen való vágással érhetők el, ezért a vágásokat 2500 W teljesítményre állítottuk. Az alkalmazott lencse 125 mm, fókusztávolság a lemezfelület alatt 2,3 mm-re volt állítva. Ez a fókusztávolság adta irodalmi adatok alapján [10] az elérhető maximális vágási sebességet T3 hőkezeltségű, 2024 jelű alumínium ötvözetben. A fókusztávolság 0,1-0,2 mm és a munkagáz nyomása 15 bar volt. A kísérletünkben az eloxált felületű alumínium vágását vizsgáljuk. Összesen 8 vágást készítettünk, mely egy kivételével mind sikeresnek ítéltünk (3. táblázat). Teljesítményt 2500 W-ra állítottuk.

3. táblázat: 3 mm vastagságú eloxált alumínium lemez vágási adatai

Vágási szám	Fókusz (mm)	f (Hz)	v (mm/min)	Kimenetel
27	-3	500	1100	részleges áthatolás
28	-3	500	1000	sikeres
29	-3	1000	1000	sikeres
30	-3	2000	1000	sikeres
31	-3	3000	1000	sikeres
32	-3	5000	1000	sikeres
33	-3	10000	1000	sikeres
34	-3	500	800	sikeres

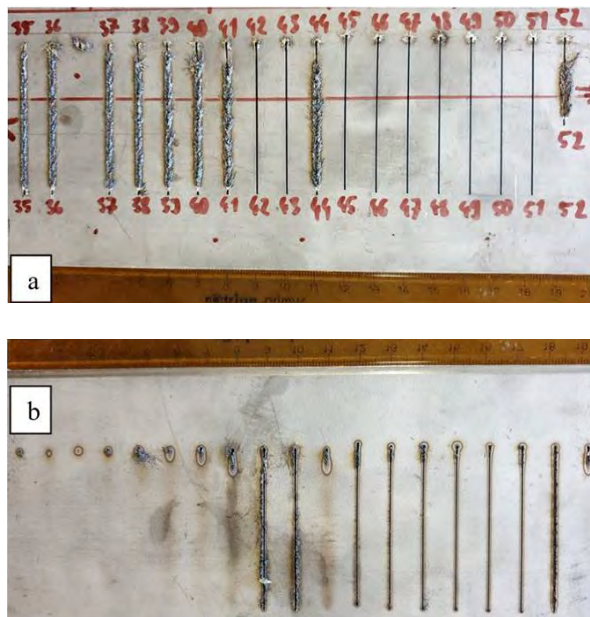
A nagy anyagvastagság ellenére a munkadarab eloxált felülete elősegítette a fény abszorpcióját az anyagban. Fókusztávolság alulra került, ami nagyobb rést, de a gyorsabb vágás lehetőségét eredményezte (5. ábra). A munkadarab bemeneteli és kimeneteli oldalán láthatóak a frekvencia és a megmunkálási sebesség paraméterváltoztatásaiból adódó eltérések. Amennyiben vágási sebesség kisebb 1000mm/min és 1000Hz felett a lézer sugara a vágás teljes hosszán áthatolt. 2000 Hz alatt szakállasodás lépett fel az anyag kimeneteli oldalán (5. ábra). A frekvencia növelése 2000 Hz felett nem javít tovább a vágás minőségén. A tölcséresség jelensége minden vágásnál jól kivehető.



51. ábra. Vágási paraméterek hatása a vágási rés alumínium lemez vágásakor

## 6. Vágási kísérlet vastag korrózióálló acéllemezen

Az alábbiakban egy a fémiparban rendszeresen használt korrózióálló acél vágási mintáit elemezzük. Összesen 18 lézersugaras vágás készült. A nagyszámú kísérletet a kezdeti nehézségek idézték elő. Annak ellenére, hogy nitrogént használtunk munkagázként, elkerülve  $\text{Cr}_2\text{O}_5$  védőréteg kialakulását, a lézersugár eleinte nem volt képes áthatolni az anyagon. A szakirodalomból vett megmunkálási sebesség 2/3-os értékén tudtunk sikeres vágást elérni. Szükséges volt továbbá a fúvóka cseréje is a kielégítő gázmennyiség eléréséhez. Az 5 mm vastag munkadarab vágásához szükséges volt a vágófej cseréje 5 col-ról 7,5 col-ra. Az imént említett két méret a vágófejben található lencseátmérőre utal. Az 5 mm vastag korrózióálló acéllemezen végzett vágási vonalai a lemez felületen és a kimeneti oldalon a 6. ábrán látható. A bemeneti oldalt látható, hogy egészen a 41. vágásig nem hatolt át a lézerfény. Itt az olvadék visszaverődött a munkadarab felszínére. 42-43-as vágás már kedvező vágási sebességgel történt, de a számottevő szakállasodás arra utalt, hogy nem elegendő a munkagáz mennyisége. A 45-ös vágást követően csökkenteni kezdtük a frekvencia értékét (lásd 4. táblázat), amely egy bizonyos pontig javított majd rontott a vágás minőségén.



6. ábra. 5 mm vastag korrózióálló acéllemez összes vágása (a) bemeneti oldal (b) kimeneteli oldal.

4. táblázat: 5 mm vastagságú korrózióálló acéllemez vágási paraméterei

Vágási vonal száma	f (Hz)	v (mm/min)	Fókusz (mm)	Fúvóka	Kimenetel
35	10000	1350	-3	1,4	sikertelen
36	10000	1200	-3	1,4	sikertelen
37	10000	1100	-3	1,4	sikertelen
38	10000	1000	-3	1,4	sikertelen
39	10000	900	-3	1,4	sikertelen
40	10000	800	-3	1,4	sikertelen
41	10000	800	-2	1,4	sikertelen
42	10000	800	-4	1,4	sikeres
43	10000	800	-2	1,4	sikeres
44	10000	800	-2	1,7	sikertelen
45	5000	800	-2	1,7	sikeres
46	3000	800	-2	1,7	sikeres

47	2000	800	-2	1,7	sikeres
48	1000	800	-2	1,7	sikeres
49	500	800	-2	1,7	sikeres
50	200	800	-2	1,7	sikeres
51	100	800	-2	1,7	sikeres
52	100	800	-2	1,7	sikertelen

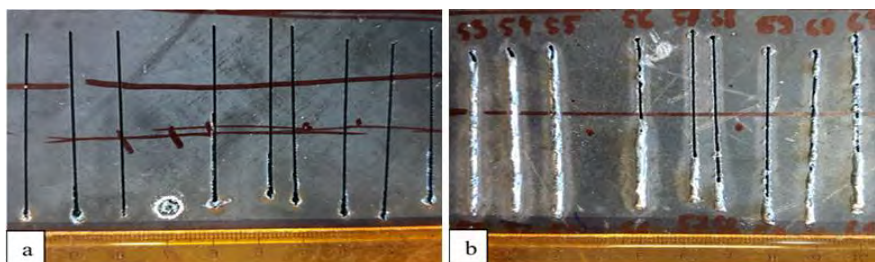
Keresztmetszetben polírozott, majd maratott állapotban is vizsgálva a vágási réseket szembetűnő, hogy az át nem menő vágásoknál a megömledt anyag a bemeneti oldal felé torlódik, míg átmenő vágásnál nagyon szép a kialakult vágott felület (7. ábra).



7. ábra. Korrózióálló acéllemez vágásai. (a) 35 vágás, (b) 41 vágás, (c) 43 vágás.  $N_{\text{erdeti}}=100x$  Marószers: királyvíz

## 7. Vágási kísérlet vastag szerkezeti acéllemezen

A CO<sub>2</sub> lézerek kulcsfontosságú szerepe van az iparban szénacélok vágásánál. A széndioxid hullámhossza nagymértékben képes elnyelődni az anyagban, ezzel jó megmunkálhatóságot biztosítva. Ennél a kísérletben 9 vágás készült. Három részlegesen sikeres vágást leszámítva sikertelen vágások készültek. Az eddigi vágási kísérletektől eltérően ezeknél a vágásoknál reakciós munkagázt, oxigént használunk. A 8. ábrán a 6 mm anyagvastagságú szerkezeti acéllemez összes vágása látható. A bemeneti oldalt láthatóan nincs visszafröcskölt anyag. A lézer kivétel nélkül áthatolt az összes vágásnál, viszont a résből kiáramló olvadék a kimeneti oldalt megtapadt néhány esetben 9. ábra. Ennek orvoslása a magasabb munkagáznyomás beállítása lehet.

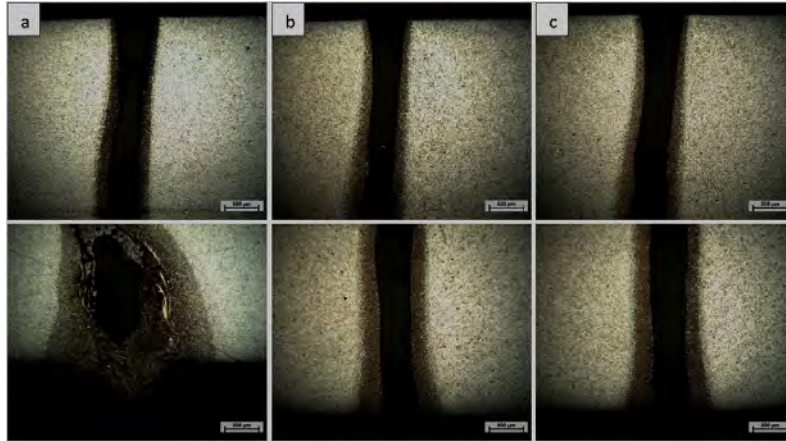


8. ábra.

6 mm vastagságú szerkezeti acéllemez összes vágása (a) bemeneti oldal (b) kimeneti oldal.

5. táblázat 6 mm vastagságú szerkezeti acéllemez vágási paraméterei

Vágási szám	P (W)	f (Hz)	v (mm/min)	Fókusz (mm)	Kimenetel
53	900	10000	1200	-2	sikertelen
54	900	10000	1100	-2	sikertelen
55	900	10000	1000	-2	sikertelen
56	900	10000	900	-2	sikertelen
57	1000	10000	900	-2	sikertelen
58	1100	10000	900	-2	sikertelen
59	1100	10000	1000	-2	sikeres
60	1100	10000	1100	-2	sikeres
61	1100	10000	1000	-3	sikertelen



9. ábra. 6 mm vastagságú szerkezeti acéllemez vágásának keresztmetszeti képe. (a) 53. vágás (b) 56. vágás (c) 57. vágás. Felső sor bemeneti oldal alsó sor kimeneti oldal. 32x nagyításban. 2%nitral oldatban maratott

## 8. Összefoglalás

A CO<sub>2</sub> lézersugaras vágási paraméterek hatástanulmányát sárgaréz, alumínium, korrózióálló acél és szénacél anyagokon végeztük. Vizsgálva a paramétermódosításokat és az eredményül kapott lézersugaras vágásokat megállapítást tettünk az adott anyaghoz tartozó optimális paraméterekre. Eredményül azt kaptuk, hogy a legszebb vágási felületet az egyes anyagoknál a következő beállítások eredményezik:

- 2,5 mm vastagságú sárgaréz lemezen grafitos felület, -0,8 mm fókusztávolság, 200 Hz, 1400 mm/min, 2500 W, nitrogén munkagáz
- 1 mm vastagságú sárgaréz lemezen grafitos felület, -1 mm fókusztávolság, 1000 Hz, 3000 mm/min, 2250W, nitrogén munkagáz
- 3 mm vastagságú alumínium lemezen, -2,3 mm fókusztávolság, 10000 Hz, 1000 mm/min, 2500 W, nitrogén munkagáz
- 5 mm vastagságú korrózióálló acéllemezen, -2 mm fókusztávolság, 500 Hz, 800 mm/min, 2500 W, nitrogén munkagáz
- 6 mm szénacél lemezen, -2 mm fókusztávolság, -2 mm fókusztávolság, 10000 Hz, 1000 mm/min, 1100 W, oxigén munkagáz

További vizsgálatokat igényel az alumínium vágásakor keletkező repedések kiváltó okának feltárása. Célszerű az ajánlottnál megfelelőbb paraméter kutatása a fentiekben említett szénacélnál.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet kívánnak mondani a Magyar Államnak, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak valamint az Európai Uniónak a No. 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00081 számú projekt támogatásáért.

## Irodalomjegyzék

- [1] Bahman Zohuri: Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials. Springer. USA, 2016. p.1
- [2] Ronald D. Schaeffer: Fundamentals of Laser Micromachining. CRC Press. USA 2012.p.25
- [3] Horváth Zoltán György: Mitől lézer a lézer? Budapest 2018.  
<https://www.youtube.com/watch?v=HZ9xU7KOe6o&t=937s>
- [4] John Powell: CO<sub>2</sub> Laser Cutting. Springer. USA, 1993
- [5] Narendra B. Dahotre, Sandip P. Harimkar: Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer. USA, 2008.p.193-196
- [6] Ion J. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application eBook ISBN: 9780080492803. 1st Edition - March 22. 2005
- [7] Riverio, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Comesaña, R., del Val, J., Pou, J. : The Role of the Assist Gas Nature in Laser

Cutting of Aluminum Alloys Physics Procedia 12(4):548-554 DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.069

- [8] <https://www.lindegas.hu/shop/hu/hu-ig/gaz>
- [9] Riverio, A., Quintero, F, del Val, J, Boutinguiza, M., Wallerstein D, Comesaña. R, Lusquiños, F., Pou, J.: Laser cutting of aluminium alloy Al-2024-T3, Procedia Manufacturing 13 (2017) 396–401 doi:10.1016/j.promfg.2017.09.028
- [10] A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquiños, R. Comesaña, J. Pou: Parametric investigation of CO2 laser cutting of 2024-T3 alloy, Journal of Materials Processing Technology, Volume 210, Issue 9, 2010, Pages 1138-1152, ISSN 0924-0136, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.024.



# MEASUREMENT OF THE SURFACE HARDNESS OF TITANIUM ALLOY SAMPLES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

**Gergely Dezső**

University of Nyíregyháza, Nyíregyháza

Sóstói út 31./B

dezso.gergely@nye.hu

**Ferenc Szigeti**

University of Nyíregyháza, Nyíregyháza

Sóstói út 31./B

szigeti.ferenc@nye.hu

**Gyula Varga**

University of Miskolc, 3515, Miskolc, Egyetemváros 1

gyula.varga@uni-miskolc.hu

*Abstract: Production of metal parts by additive manufacturing opens up opportunities for manufacturing machine elements with special shape, materials and composites. Material properties strongly depend on processing parameters. In this study HV10 surface hardness of Ti6Al4V samples produced by selective laser melting was investigated in case of different additive manufacturing parameters before and after diamond burnishing. Empirical formulas were fit to experimental data. Results show that surface hardness and machinability depends on laser power and laser scan speed applied during production, and optimal burnishing parameters are proposed after evaluation of results.*

## 1. Introduction

Increasing market globalization, global competition, and the growing complexity of products result in the application of new technologies, methods, and business processes. The Industry 4.0 concept is drastically changing manufacturing processes [1]. Additive manufacturing technologies are also coming to the fore. Selective laser melting (SLM) is one of the most common methods for the additive production of metal-based components [2]. In this method, a layer of metal powder is most often melted by means of a laser beam in an inert gas atmosphere. Ti6Al4V is a widely used alloy in medical and industrial applications, whether in machined or additively manufactured form. The surface treatment of the titanium material plays a prominent role in influencing its functional characteristics such as abrasion resistance, fatigue strength, corrosion resistance and frictional power loss. Normal machining processes such as turning, milling or even classical grinding do not achieve the desired surface quality [3]. The machinability of the Ti6Al4V alloy depends on the conditions of its production [4]. Hereinafter, this article focuses on the selectively laser melting form of the material. The examination of the surface hardness of metal parts made with 3D printing is justified due to the consideration and consideration of the possibilities of later practical applications. The abrasion resistance of Ti-6Al-4V alloys is relatively low, which limits their biomedical use [5]. The usability for orthopaedic purposes (making implants), the use of orthopaedic Ti alloys as wear parts justifies the examination of surface modifications on parts made of Ti alloys, which increase the surface hardness, improve the surface roughness and thus contribute to the increase of wear resistance. Based on experimental experience, the surface hardness and wear resistance can be increased by diamond reinforcement for components made of conventional metal alloys [6]. In terms of practical applicability, it is important to know the extent to which the surface hardness of printed parts is affected by the parameters of 3D printing and surface modification with diamond burnishing. The surface hardness of the printed specimens was measured by HV10 Vickers hardness measurement according to the valid MSZ EN ISO 6507-1 standard [7] in an accredited material testing laboratory.

## 2. Application of the diamond burnishing on an external cylindrical surface

Sliding friction burnishing is kinematically similar to turning, but instead of the edge of the single point cutting tool, the burnishing tool having spherical end pressed to the surface to be machined. The method creates a plastic deformation on the surface of the machined workpiece and in the near-surface layers (Fig. 1) [8].

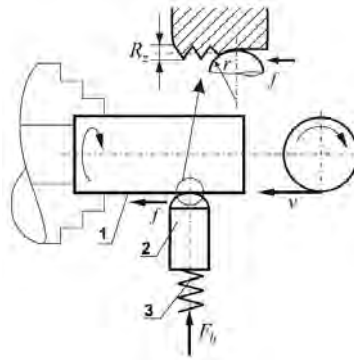


Figure 1, Schematic diagram of sliding friction burnishing [8]

( $r$  - radius of burnishing ball; 2 - burnishing tool, 3 - spring;  $F_b$  - force;  $v$  - speed;  $f$  - feed)

Sliding friction burnishing tools can be used on all conventional and CNC controlled lathes or CNC turning centres. Thus, immediately after machining, the workpieces can be burnished in the same clamping as the machining. Sliding friction burnishing can be used to treat outer cylindrical surfaces, large diameter inner cylindrical surfaces, but even flat surfaces as well. The main technical and technological parameters of the production of the sliding friction burnishing process: the radius of the spherical end tip of the deforming element  $r$ , mm; burnishing force  $F$  (or  $F_b$ ) [N]; feed  $f$  [mm/rev]; burnishing speed  $v$  [m/min]. Additional factors include the number of burnishing passes  $i$  and the type of lubricant. The technology of reinforcement has been studied by several people on different material qualities, with different tools, in order to meet different expected requirements. Examples, without wishing to be exhaustive, are as follows.

Total surface integrity was analysed by Rotella et al. [9] in terms of surface roughness, microhardness, microstructural changes, and tribology. In particular, the results obtained showed that cryogenic cooling conditions and coating significantly improve the hardness of the burnished workpiece, while MQL lubrication leads to excellent surface roughness.

A study by Samatham et al. [3] deals with the study of different burnishing processes in the titanium alloy Ti6Al4V. According to their study, cryogenic burnishing is one of the latest innovation techniques using liquid nitrogen for cooling.

In their study, Tobola et al. [10] subjected the Ti6Al4V alloy to a multi-step hybrid treatment, including turning and burnishing and gas nitriding. They found that the use of sliding friction burnishing and low temperature gas nitriding increases the surface hardness by 5-10% without compromising the strength of the substrate material.

### 3. EXPERIMENTAL CONDITIONS

#### 3.1. Material

Ti6Al4V is a titanium (Ti) alloy widely used in industry. Advantages of Ti6Al4V are low mass density, high strength relative to even most of other Ti alloys, chemical endurance, and biocompatibility [11]. However, Ti6Al4V alloy's disadvantage is that it has poor tribological properties, that is weak wear resistance and unstable friction coefficient [12]. Chemical composition of Ti-6Al-4V Grade 5 can be contained Table 1 [13].

Table 1 Chemical Composition of Ti-6Al-4V [13]

C	O	N	H	Fe	Al	V	*Other1	*Other2
≤0.08	≤0.20	≤0.05	≤0.015	≤0.40	5.5-6.75	3.5-4.5	≤0.1	≤0.4

\*All values are in weight %; \*Other1: maximum each of other elements; \*Other2: maximum total of other elements.

#### 3.2. Experimental methodology

Cylindrical test samples were produced for experiments by selective laser melting. Production was performed by an EOS M290/400W system. 5 groups of specimens, each of those containing 8 piece were used for experiments. Items in a group

produced by the same additive manufacturing technology parameters, but different groups had different parameters. Groups are denoted by letters A, B, C, D, E.

There were two manufacturing parameters varied between groups: infill laser power and infill laser scan speed. Values are presented in Table 2. All other selective laser melting parameters kept constant. Table 3. show two important parameter, layer thickness and hatch distance which also were the same for each sepecimen.

Table 2 Additive manufacturing parameters of producing the specimens

Code of parameter setup	infill laser power [W]	infill laser scan speed [mm/s]
A	233.33	1200
B	280.00	1000
C	336.00	1441
D	233.33	1000
E	280.00	1200

Table 3. Main parameters kept constant for each specimen

Name of manufacturing parameter	Value of manufacturing parameter
layer thickness	0.03 mm
hatch distance	0.14 mm

The burnishing procedure was executed by a natural PCD tool having a radius of  $R=3.5$  mm. In the experiments executed, three factors were applied: burnishing speed ( $v$ ), feed ( $f$ ) and burnishing force ( $F$ ). In case three factors, by using the full factorial experiment design method the number of the experiments are  $n=8$ , because all the factors are set to a minimum and a maximum value. These combinations can be seen in Table 4. In determining the numerical values, we took into account the results of our previous theoretical and practical research.

Table 4 Burnishing parameters

No	Speed, $v$ [m/min]	Feed, $f$ [mm/rev]	Force, $F$ [N]
1	8.321	0.0125	80
2	11.775	0.0125	80
3	8.321	0.0500	80
4	11.775	0.0500	80
5	8.321	0.0125	120
6	11.775	0.0125	120
7	8.321	0.0500	120
8	11.775	0.0500	120

These technological parameters were used for all the additively manufactured specimen. Denominations: for specimens produced by additive manufacturing parameters belonging to "A" (Table 2) burnished by technological parameters "1" (Table 3) denoted A1 (can be found in Table 5.)

### 3.3. Hardness measurements on the outer cylindrical surface of test specimens

The surface of the selective laser sintered specimens was uneven and unsuitable for hardness measurement, therefore, in preparation, a smooth turning was performed on the circumferential surface of the specimens with a 0.25 mm depth of cut, which reduced the diameter of the specimens to 9.5 mm. The surface hardness measurement was executed on a hardness measuring machine type HPO-250, with a test load of  $F_h=98.07$  N, performed at 3 locations on the mantle surface of the specimens at  $120^\circ$ , and then the mean and standard deviation of the measurements were determined (Fig. 2). The hardness values HV10 Vickers were determined according to the standard MSZ EN ISO 6507-1 [7], using a  $136^\circ$  diamond pyramid test specimen based on the following equation:



Figure 2

Measurement of HV10 in a prism on the outer cylindrical surface

The hardness values HV10 Vickers were determined according to the standard MSZ EN ISO 6507-1 [7], using a 136 ° diamond pyramid test specimen based on the Formula (1).

$$HV = 0.102 \cdot \frac{2F_h \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0.1891 \frac{F_h}{d^2} \quad (1)$$

where:  $d$ : average of the impression values

$F_h$ : test load ( $F_h = 98.07\text{N}$  for HV10)

When measuring the surface hardness, the hardness determined on cylindrical surfaces according to MSZ EN ISO 6507-1 shall be determined according to Table B5 of the standard taking into account the correction factor given in the table. Therefore, the HV10 value determined from the impression diameters measured on the cylindrical surface was multiplied for each measurement by the correction factor shown in [14]. The tables of HV10 measurement results reported on cylindrical surfaces in Section 3 contain the corrected HV10 hardness values in each case. Determination of the correction factors according to MSZ EN ISO 6507-1.

## 4. Results and evaluation

For evaluation of measured hardness value improvements because of burnishing improvement ratios were introduced, which are shown in formula (2) [15].

$$IRHV = \frac{HV_a - HV_b}{HV_a} \cdot 100\% \quad (2)$$

where:

$IRHV$  - the ratio of surface micro-hardness improvement (%)

$HV_a$  - the surface micro-hardness after burnishing process

$HV_b$  - the surface micro-hardness before burnishing process

The average of the measured data and the calculated improvement ratios are summarized in Table 5.

Table 5 Measured HV10 values and calculated improvement ratios

No	HV10 Before burnishing	HV10 After burnishing	IRHV <sub>A</sub> , %
A1	365.33	405.67	9.94
A2	377.10	357.33	-5.53
A3	361.57	397.67	9.08
A4	386.90	357.33	-8.27

No	HV10 Before burnishing	HV10 After burnishing	IRHV <sub>B</sub> , %
B1	387.40	394.33	1.76
B2	373.63	365.23	-2.30
B3	370.47	392.43	5.60
B4	382.67	395.93	3.35

A5	372.73	432.00	13.72
A6	368.10	393.03	6.34
A7	365.53	394.00	7.23
A8	378.20	392.33	3.60

B5	374.77	382.70	2.07
B6	359.00	426.23	15.77
B7	373.47	356.50	-4.76
B8	366.23	383.13	4.41

No	HV10 Before burnishing	HV10 After burnishing	IRHV <sub>C</sub> , %
C1	399.27	392.07	-1.84
C2	388.23	384.67	-0.93
C3	378.80	394.23	3.91
C4	397.00	386.90	-2.61
C5	381.73	369.03	-3.44
C6	376.00	403.73	6.87
C7	357.10	383.10	6.79
C8	382.57	384.47	0.49

No	HV10 Before burnishing	HV10 After burnishing	IRHV <sub>D</sub> , %
D1	380.90	372.50	-2.26
D2	377.63	366.60	-3.01
D3	376.40	356.10	-5.70
D4	390.90	368.70	-6.02
D5	378.80	337.43	-1.26
D6	380.30	407.73	6.73
D7	384.30	370.50	-3.72
D8	374.43	370.07	-1.18

No	HV10 Before burnishing	HV10 After burnishing	IRHV <sub>E</sub> , %
E1	387.80	394.90	1.80
E2	383.70	357.57	-7.31
E3	373.77	343.87	-8.70
E4	376.47	364.53	-3.27
E5	379.97	367.30	-3.45
E6	381.40	351.40	-8.54
E7	395.67	391.30	-1.12
E8	368.47	414.50	11.11

Using of a full factorial experiment design programme written „MathCAD 15.0” software empirical formulas (3-7) were created. Using formulas (3-7) axonometric figures (Figure 3-7) could be drawn.

$$IRHV_A = 64.609 - 7.895 \cdot v + 1.12 \cdot 10^3 \cdot f - 0.233 \cdot F - 101.45 \cdot v \cdot f + 0.045 \cdot v \cdot F - 12.795 \cdot f \cdot F + 1.087 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (3)$$

$$IRHV_B = 99.73439 - 12.858 \cdot v - 259.406 \cdot f - 1.1 \cdot F + 111.87 \cdot v \cdot f + 0.144 \cdot v \cdot F + 3.069 \cdot f \cdot F - 1.224 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (4)$$

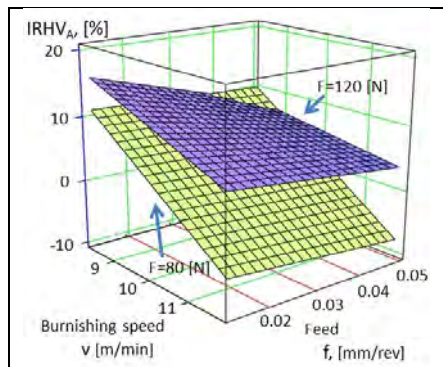


Figure 3  
Changing of improvement ratio of HV10 in case of specimen A

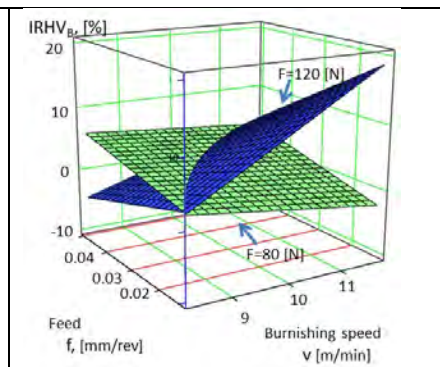


Figure 4  
Changing of improvement ratio of HV10 in case of specimen B

$$IRHV_C = 54.305757 - 6.234 \cdot v - 787.77 \cdot f - 0.828 \cdot F + 84.385 \cdot v \cdot f + 0.09 \cdot v \cdot F + 17.73 \cdot f \cdot F - 1.772 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (5)$$

$$IRHV_D = 151.25 - 14.947 \cdot v - 2.927 \cdot 10^3 \cdot f - 1.88 \cdot F + 263.96 \cdot v \cdot f + 0.184 \cdot v \cdot F + 35.097 \cdot f \cdot F - 3.258 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (6)$$

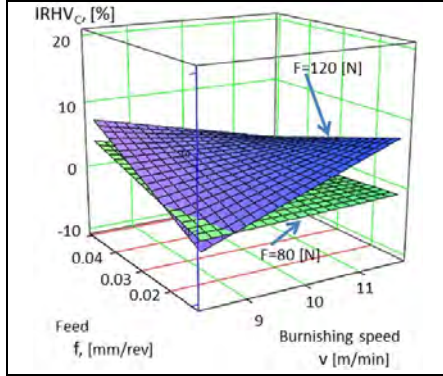


Figure 5  
Changing of improvement ratio of HV10 in case of specimen C

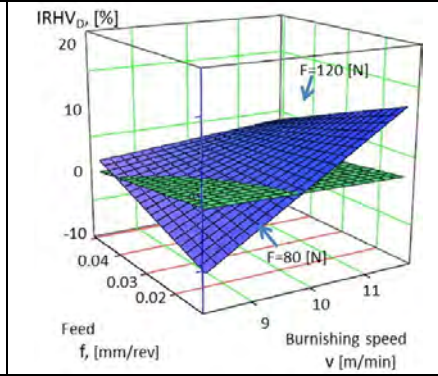


Figure 6  
Changing of improvement ratio of HV10 in case of specimen D

$$IRHV_E = 72.88045 - 5.832 \cdot v - 1.541 \cdot 10^3 \cdot f - 0.424 \cdot F + 69.33 \cdot v \cdot f + 0.022 \cdot v \cdot F + 4.088 \cdot f \cdot F + 0.537 \cdot v \cdot f \cdot F \quad (7)$$

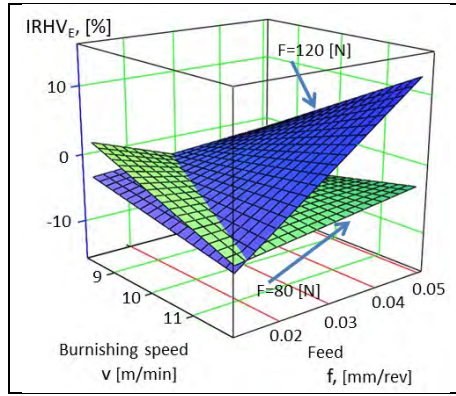


Figure 7  
Changing of improvement ratio of HV10 in case of specimen E

A comparison of the specimen produced in 5 different additive manufacturing parameter combinations was performed by comparing the maximum hardness improvements achieved with 8 different burnishing technology parameter combinations. According to this, we were able to see the greatest value of the maximum improvement ( $IRHV_B=15.77\%$ ) in the hardness of diamond burnished on the specimens produced with the additive technology B - infill laser power was medium (280 W), infill laser speed the smallest (1000 mm/s) and energy input the largest ( $66.667 \text{ W/mm}^3$ ). Where the burnishing technology parameters were as follows:  $v_2 = 11,775 \text{ m/min}$ ; feed  $f_1 = 0.0125 \text{ mm/rev}$  and burnishing force  $F_2 = 120 \text{ N}$ .

In this respect, the smallest maximum hardness improvement ( $IRHV_D=6.73\%$ ) of diamond burnishing was obtained on the test specimens produced with the additive technology D. The additive technological parameters in case of specimen D are: - infill laser power was medium (233.33 W), infill laser speed is the lowest (1000 mm/s) and energy input is the highest ( $55.556 \text{ W/mm}^3$ ).

## 5. Summary and conclusions

The surface hardness of parts made by additive manufacturing was examined before and after surface modification executed by diamond burnishing. The cylindrical shape specimens were made by selective laser melting from Ti6Al4V. The specimens

were manufactured with five (signed A, B, C, D and E) different SLM manufacturing parameters and 8 specimens were prepared and tested in each case. Sliding friction burnishing was chosen for the post-machining of the surfaces of specimens A-E. The parameters of diamond burnishing were determined by a three-factor, two-level full factorial experimental design. During diamond burnishing the burnishing speed, feed, and burnishing force were varied. This means that for each combination of different SLM manufacturing parameters, a diamond burnishing operation with 8 different parameters was performed. The surface Vickers hardness of HV10 was measured before and after burnishing on a hardness measuring equipment type HPO-250. Based on the HV10 surface hardness values, the surface hardness improvement ratios were calculated for each case.

It can be stated that from additive technological point of view the largest energy input ( $66.667 \text{ W/mm}^3$ ) was the most advantageous. From burnishing Technological point of view the larger burnishing force ( $F_2 = 120 \text{ N}$ ), the largest burnishing speed  $v_2 = 11,775 \text{ m/min}$  and the smaller feed  $f_1 = 0.0125 \text{ mm/rev}$  serve the best result.

## 6. ACKNOWLEDGMENTS

“Project no. NKFI-125117 has been implemented with the support provided from the National Research, Development and Innovation Fund of Hungary, financed under the K\_17 funding scheme.” This work was co-supported by project entitled „Research of osteosynthesis of implants and development trabecular structure using additive manufacturing”, and with identification number: GINOP-2.2.1-15-2017-00055. Test specimens were manufactured at Biomechanical Laboratory at University of Debrecen, Hungary within the research work of the project.

## References

- [1] Kovács, G., and Kot, S.: New logistics and production trends as the effect of global economy changes. *Polish Journal of Management Studies*, 2016, Vol.14, pp.: 121–134.
- [2] Thompson, M. K. et al: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016) 737–760
- [3] Samatham, M., Kumar U, A., Pappula, L.: Critical review on different burnishing processes of Ti-6Al-4V Alloy, *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2020 Vol. 7, Issue 1, pp.: 266-273, DOI: <https://doi.org/10.32628/IJSRSET20721>
- [4] Arrazola, P.-J.; Garay, A.; Iriarte, L. M.; Armendia, M.; Marya, S.; et al: Machinability of Titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, 2009, 209 (5), pp.2223-2230. 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020. hal-01002827
- [5] Sandomierski, M., Buchwald, T., Patalas, A. et al. Improving the abrasion resistance of Ti6Al4V alloy by modifying its surface with a diazonium salt and attaching of polyurethane. *Sci Rep* 10, 19289 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76360-3>
- [6] Toboła, D., Morgiel, J., Majb, Ł.: TEM analysis of surface layer of Ti-6Al-4V ELI alloy after slide burnishing and low-temperature gas nitriding, *Applied Surface Science* 515 (2020) 145942, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145942>
- [7] MSZ EN ISO 6507-1: 2018: Fémek. Vickers-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás
- [8] Maximov, J. T., Anchev, A. P., Duncheva, G. V., Ganev, N, Selimov, K. F.: Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminium alloys, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39(8) (2017) pp.: 3067–3078
- [9] Rotella, G., Rinaldi, S. & Filice, L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *Int J Adv Manuf Technol* 106, 431–440 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [10] Toboła, D., Morgiel, J., Majb, Ł.: TEM analysis of surface layer of Ti-6Al-4V ELI alloy after slide burnishing and low-temperature gas nitriding, *Applied Surface Science* 515 (2020) 145942, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145942>

- [11] Shunmugavel, M.; Polishetty, A.; Nomani, J.; Goldberg, M.; Littlefair, G. Metallurgical and Machinability Characteristics of Wrought and Selective Laser Melted Ti-6Al-4V, *J of Metallurgy*, 2016, p. e7407918, Oct. 2016, doi: 10.1155/2016/7407918.
- [12] Kandeve, M.; Kostadinov, G.; Penyashki, T.; Kamburov, V.; Dimitrova, R.; Valcanov, S.; Nikolov, A.; Elenov, B.; Petrzik, M. Abrasive Wear Resistance of Electrospark Coatings on Titanium Alloys, *Tribol. Ind.*, 2022, 44, no. 1, pp. 132–142, doi: 10.24874/ti.1143.06.21.09.
- [13] [http://www.metalspiping.com/titanium-alloy-ti-6al-4v.html#:~:text=Ti-6Al-4V%20is%20the%20nominal%20composition%20of%20titanium%20alloy,it%20accounts%20for%2070%25~80%25%20of%20world%E2%80%99s%20titanium%20market.\(04.15.2022\)](http://www.metalspiping.com/titanium-alloy-ti-6al-4v.html#:~:text=Ti-6Al-4V%20is%20the%20nominal%20composition%20of%20titanium%20alloy,it%20accounts%20for%2070%25~80%25%20of%20world%E2%80%99s%20titanium%20market.(04.15.2022))
- [14] Dezső, G., Szigeti, F., Kósa, P.: Additív gyártásalkészített Ti6Al4V próbatestek felületi keménységének vizsgálata, XXX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, OGÉT–2022, <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/772/742>
- [15] T. A. El-Taweel & M. H. El-Axir, Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique, *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 41:301–310, DOI 10.1007/s00170-008-1485-6



# INVESTIGATIONS ON THE DISSIMILAR JOINING - AL2024 RIVET WITH A PEI POLYMER

**Anamaria Ioana FEIER**  
*Universitatea Politehnica Timisoara*  
*Romanian Welding Society*

**Oana Roxana CHIVU**  
*Universitatea Politehnica din București*

Abstract: The ever-increasing demand for cost savings and high product performance has driven researchers and engineers to continuously develop new materials and technologies. The results of these efforts are, for example, so-called hybrid assemblies and sub-assemblies, where the mechanical performance of products is improved by combining the positive characteristics of individual materials. An important class of hybrid assemblies is the class of polymer-metal hybrid assemblies used in various industries such as the transport industry or the modern civil construction industry. Due to problems related to the size of the compounds, manufacturing possibilities and some physico-chemical incompatibilities between materials, hybrid joints often occur within these hybrid assemblies. A new riveting technique has been developed in this respect, namely friction riveting. This paper presents research on this hybrid joint between a metal and a polymer. In the simplest version of this process, a metallic rivet (AL2024) of cylindrical shape is rotated and inserted into a plate of a polymeric material (PEI).

Key words: innovative hybrid joining, FricRiveting

## 1. Introduction

Friction riveting is an innovative hybrid joining process developed and patented by Helmholtz Zentrum Geesthacht in Germany. In this paper the joining is done by mechanical interference and adhesion between a metal rivet and a polymer. The process is based on the principles of mechanical clamping and friction welding; the energy required for joining is provided by the rotation of the metal rivet in the form of heat resulting from friction.

FricRiveting is a new method for joining light metals, e.g. aluminium alloys, magnesium, titanium, etc. The FricRiveting process is carried out in the solid state, is a purely mechanical process, and is a new joining method for similar and dissimilar materials from the category of aluminium, magnesium and titanium alloys. Unlike the classical riveting process, this process involves pressing a rotating rivet, which pierces the polymer forming a mechanical interlocking by the rivet remaining in the two materials to be joined. During this process heat is generated by friction, softening the material so that the rivet is allowed to penetrate through the joining material without undesirable metallurgical changes occurring. The strength of such a joint comes from three sources: from the mechanical joint (interlocking) between the rivet and the material, from the mixing zone of the materials in the near of the rivet, and from the solid state joint between the joining materials in the vicinity of the mixing zone.

As a result, research on the application of the AL2024 -PEI friction riveting process needs to be further developed to reach a level of knowledge that allows understanding of the specific phenomena that occur, as well as increasing the applicability of the process especially in high-end industrial fields.

In the present phase of the project the research team has aimed to improve the laboratory equipment from IMF, in order to test then in preliminary experimental of the innovative solutions proposed in the paper.

The tests carried out on these joints are so far pre-tests which have shown a result almost similar to that obtained at Helmholtz Zentrum Geesthacht in Germany.

## 2. Description of the research

Based on previous research carried out in the HZG, an attempt was made in the IMF laboratory to produce the hybrid PEI-AL202. The research steps were as follows:

- modifying existing infrastructure in the IMF laboratory (G13 drilling machine)
- development of a joining technology by riveting two different materials

The first stage of the research, namely the stage of modifying the drilling machine, lasted several weeks because the drilling machine motor had to be modified to obtain an adequate number of revolutions in order to achieve the penetration of the PEI polymer by the aluminium cast (AL2024).

In the second stage, the pre-testing took about 1-2 months until an anchoring of the rivet approximating the anchoring obtained by the Hamburg HZG research institute was obtained.



Fig. 1 On the left side the joint obtained at IMF (UPT) and on the right side the joint obtained at HZG (Germany).

The pin is made of aluminum, Al2024-T351.

Material: Al2024-T351

Density: 2,78 [g/cm<sup>3</sup>]

Elasticity modulus: 76000 MPa

R<sub>m</sub> [MPa]: 470

R<sub>p0.2</sub> [MPa]: 334



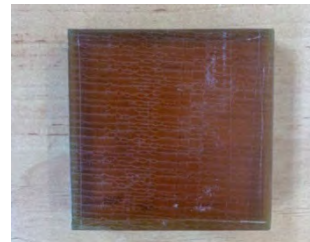
The plate is made of PEI, polyetherimide.

Density: 1,27 [g/cm<sup>3</sup>]

Elasticity modulus: 3500 MPa

R<sub>m</sub> [MPa]: 129

R<sub>p0.2</sub> [MPa]: 129



Polyetherimide (PEI) is a high performance thermoplastic. Characteristics of PEI include high strength and stiffness at high temperatures, long-term heat resistance, dimensional stability and good electrical properties.

PEI is amorphous and transparent with a straw-like tint. It is colourable. It has outstanding dimensional stability and is inherently flame retardant. PEI is not resistant to chemicals such as hydrocarbons, alcohols and halogenated solvents.

Long-term bend resistance allows PEI to replace metals and other materials in many structural applications. Electrical properties exhibit excellent stability under varying temperature, humidity and frequency conditions.

Characteristics:

- Durability
- 700 °F Melting temperature
- Good chemical resistance
- Resistance to steam, x-rays and ethylene oxide sterilizable

Applications: Reflectors, lamps, Electrical components, oil and chemical industry, medical instruments.

After the modification of the G13 drill, a series of Al2024-PEI hybrid joints were made until the desired penetration form was obtained (based on HZG know-how) was achieved. Once the team had obtained a number of 5 specimens with approximately the same penetration form, these specimens were prepared for destructive examination in order to have a comparison also in terms of the bearing capacity. Assemblies of this kind are used in inside of various aerospace components (e.g. for seat and ceiling fastenings inside aircraft).



Figure 2. G13 drilling machine used for FricRiv

### 3. Examination

The pull-off test was carried out on the tensile testing machine using a clamping device. As it is known from the theory of limit stress states, any stress state is equivalent, based on certain criteria, to the simplest and most experimentally feasible stress state, that of the uniaxial stretch. In this way, the behaviour of materials at uniaxial strain is of interest not only for the tensile stress itself, but also for all other stress states. It is therefore considered that the tensile test is the basic test of a material. This is supplemented, in some cases, by specific tests as bending.

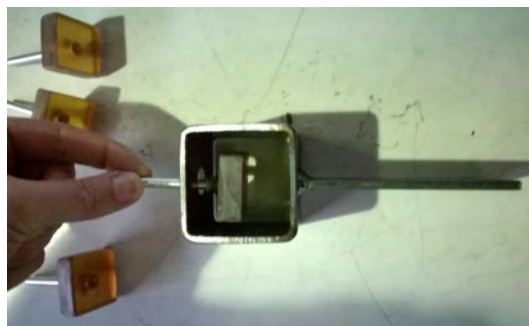


Figure 3. The clamping device

From the graph above it can be seen that for all four specimens that the pull-out force is between approximately 8 and 10 kN.

The failure mode noticed is that by pulling out the rivet from the polymer.

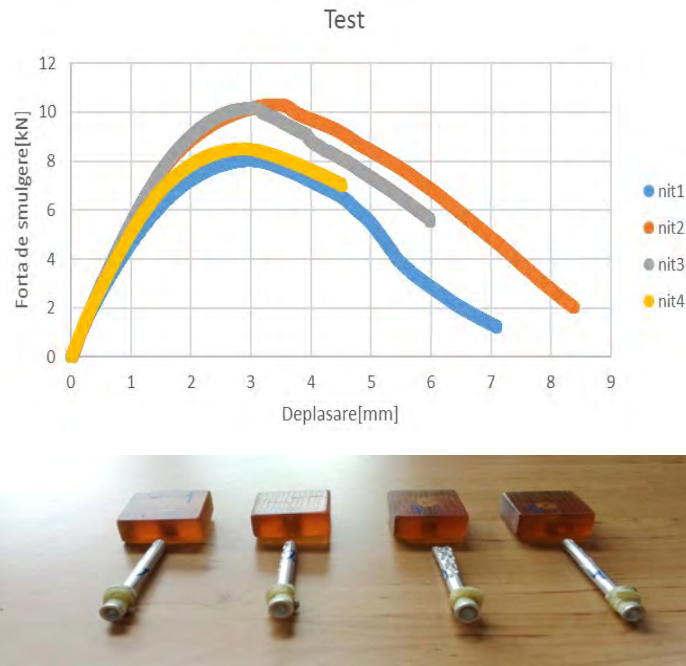


Figure 4. Results of pull-out tests

The simulation was prepared and run in ANSYS v19.1. It started with the modeling of the components then the definition of the materials, the discretization of the model, the application of loads and the definition of conditions on the contour, all of which can be seen in the below figures.

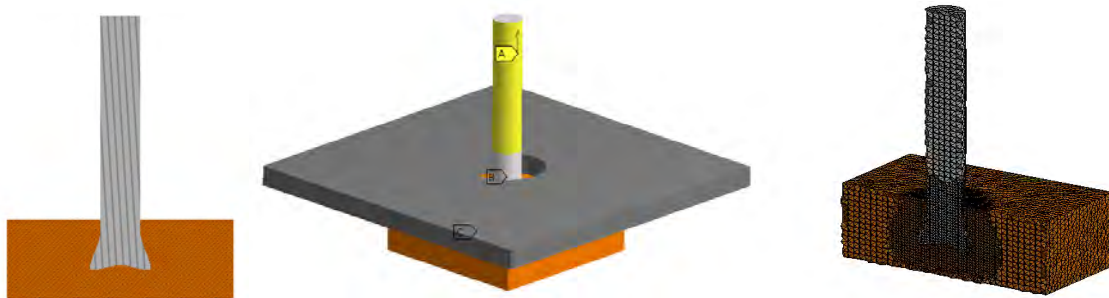


Figure 5. Steps from FEM modeling

Finite elements differ from each other in their geometric shape and the number and type of independent displacements (degrees of freedom - GDL) that attach to the nodes. The choice of finite elements used in the analysis depends on the shape and behaviour of the structure. The elements must be compatible with the spatial development of the structure in order to simulate its behaviour as well as possible. Thus, if the structure has an unidirectional development, the corresponding finite elements must be one-dimensional (1D), straight or curved, if it has a bidirectional development the corresponding finite elements must be two-dimensional (2D), with straight or curved sides and if it has a spatial development the corresponding finite elements must be three-dimensional (3D), with flat or curved sides.

Three-dimensional higher order tetrahedron elements were used to discretise the model. In the area of interest, the elements can be seen to be thickened for better evaluation and for results closer to reality.

Displacement [mm]	Deformation [mm]	Stress Equivalent (von-Mises) Stress [MPa]
1.6		
2.9		
7.3		

#### 4. Conclusions

The way of failure is similar to that observed in real tests, as can be seen in the figures presented in the paper. The failure mode noticed is that by pulling out the rivet from the polymer.

The study showed that the number of revolutions (10000 rpm) at which the drill machine was upgraded did not lead to a high polymer displacement failure, on the contrary the failure was with very small displacement of polymer as can be seen in the below picture.



Figure 6. Joint failure

Method of obtain the joint by using the drilling machine and the short time of execution of the joint did not allow the material to have major changes (local heating of the polymer) in the area of the pin and so there were not major changes in material and the pull-out force was quite high around 8-10 KN.

## References

- [1] Feier A., Becheru A., Brindusoiu M., Blaga L. Process Transferability of Friction Riveting of AA2024-T351/Polyetherimide (PEI) Joints Using Hand-Driven, Low-Cost Drilling Equipment. *Processes*, 2021. Available online: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/8/1376>
- [2] Modi, S.; Stevens, M.; Chess, M. Mixed Material Joining Advancements and Challenges. *Cent. Automot. Res.* 2017. Available online: [http://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2017/05/Joining-Whitepaper-Final\\_May16.pdf](http://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2017/05/Joining-Whitepaper-Final_May16.pdf) (accessed on 1 May 2021).
- [3] Filho, S.T.A.; Blaga, L.-A. *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures: Principles and Applications*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2018.
- [4] Amancio-Filho, S.T.; Beyer, M.; Santos, J.F. Method of Connecting a Metallic Bolt to a Plastic Workpiece. U.S. Patent No. 7,575,149, 18 August 2009.
- [5] Amancio-Filho, S.T. *Friction Riveting: Development and Analysis of a New Joining Technique for Polymer-Metal Multi-Materials Structures*; Technische Universität Hamburg-Harburg: Hamburg, Germany, 2007.
- [6] Cipriano, G.P.; Blaga, L.A.; Dos Santos, J.F.; Vilaça, P.; Amancio-Filho, S.T. Fundamentals of Force-Controlled Friction Riveting: Part I—Joint Formation and Heat Development. *Materials* 2018, 11, 2294. [CrossRef] [PubMed]
- [7] Cipriano, G.P.; Blaga, L.A.; Dos Santos, J.F.; Vilaça, P.; Amancio-Filho, S.T. Fundamentals of Force-Controlled Friction Riveting: Part II—Joint Global Mechanical Performance and Energy Efficiency. *Materials* 2018, 11, 2489. [CrossRef] [PubMed]
- [8] Rodrigues, C.; Blaga, L.; dos Santos, J.; Canto, L.; Hage, E.; Amancio-Filho, S. FricRiveting of aluminum 2024-T351 and polycarbonate: Temperature evolution, microstructure and mechanical performance. *J. Mater. Process. Technol.* 2014, 214, 2029–2039. [CrossRef]
- [9] De Proença, B.C.; Blaga, L.; Dos Santos, J.F.; Canto, L.B.; Amancio-Filho, S.T. Friction riveting ('FricRiveting') of 6056 T6 aluminium alloy and polyamide 6: Influence of rotational speed on the formation of the anchoring zone and on mechanical performance. *Weld. Int.* 2017, 31, 509–518. [CrossRef]
- [10] Johnson, R.O.; Burlhis, H.S. Polyetherimide: A new high-performance thermoplastic resin. *J. Polym. Sci. Polym. Symp.* 2007, 70, 129–143. [CrossRef]
- [11] Borges, M.; Amancio-Filho, S.; dos Santos, J.; Strohaecker, T.; Mazzaferro, J. Development of computational models to predict the mechanical behavior of Friction Riveting joints. *Comput. Mater. Sci.* 2012, 54, 7–15. [CrossRef]
- [12] Hynes, N.R.J.; Vignesh, N.J.; Velu, P.S. Low-speed friction riveting: A new method for joining polymer/metal hybrid structures for aerospace applications. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2020, 42, 1–16. [CrossRef]
- [13] Gagliardi, F.; Conte, R.; Ciancio, C.; Simeoli, G.; Pagliarulo, V.; Ambrogio, G.; Russo, P. Joining of thermoplastic structures by Friction Riveting: A mechanical and a microstructural investigation on pure and glass reinforced polyamide sheets. *Compos. Struct.* 2018, 204, 268–275. [CrossRef]

# AUTÓIPARI DP ACÉL FINOMLEMEZEK LÉZERSUGARAS HEGESZTÉSE ÉS UTÓKEZELÉSE

## LASER BEAM WELDING AND POST-WELD HEAT TREATMENT OF AUTOMOTIVE DP STEEL SHEETS

**Dr. Gáspár Marcell**

Anyagszerkeztani és  
Anyagtechnológiai Intézet  
Miskolci Egyetem, 3515  
Miskolc-Egyetemváros

metgaspar@uni-miskolc.hu

**Dr. Sisodia  
Raghawendra**

Anyagszerkeztani és  
Anyagtechnológiai Intézet  
Miskolci Egyetem, 3515  
Miskolc-Egyetemváros

metraghu@uni-miskolc.hu

**Draskóczi László**

Budai Benefit Kft.  
2314 Halásztelek  
Páger Antal u. 4.

draskoczilaslo@bubenlaser.com

*Absztrakt – Nagy szilárdságuk és jó alakíthatóságuk miatt a kettős-szövetű DP acélokat széles körben alkalmazzák az autóiparban karosszériaelemek anyagaként. A kötéstechológiák közül egyaránt alkalmazzák az ellenállás ponthegeztést és a lézersugaras hegeztést. Hegesztésük során az alkalmazott hegeztéstechológia függvényében problémát jelent a varratban és a hőhatásövezetben tapasztalható keményedés és lágyulás. A dióda lézereket elsősorban a felületkezelések és a felrakóhegeztés területén alkalmazzák, mivel a fókuszált terület nagysága viszonylag széles tartományban változtatható. Ezt az előnyös tulajdonságukat kötőhegeztéseknél is ki lehet használni, mivel ennek köszönhetően a kötőhegeztés egy pontszerű hőforrással elvégezhető, a fókuszált terület nagyságának növelésével pedig ugyanazzal a berendezéssel elvégezhető a varrat és a hőhatásövezet utóhőkezelése. Kísérleti munkánk során DP800, DP1000 és DP1200 anyagminőségű 1 mm vastagságú finomlemezekből hozaganyag nélküli tompakötéseket készítettünk dióda lézer alkalmazásával. A hegeztés során a fókuszált terület nagysága 2×2 mm, az utóhőkezelésnél pedig 15×6 mm volt. A hegeztés és az utóhőkezelés is 4.6 tisztaságú argon védőgázzal történt. A termoelemes mérés segítségével meghatározott  $t_{1/5}$  hűlési idő nagysága 2,8 s volt. A hegeztést követő utóhőkezelésnél a varrat és a hőhatásövezet 650 °C-on történő megeresztésére törekedtünk. A hegeztett kötések tulajdonságait optikai mikroszkópos vizsgálattal, szakító- és keménységvizsgálattal elemeztük. A dióda lézersugaras hegeztés alkalmasnak bizonyult a vizsgált nagyszilárdságú finomlemezek hegeztésére. Az autogén hegeztésből adódóan a hegeztett kötések szilárdság szempontjából kritikus részének a varrat bizonyult, amely a megfelelő szilárdságú hozaganyag alkalmazásával kompenzálható. Az utóhőkezelés alkalmazása a hőhatásövezet tekintetében előnyösnek bizonyult, mivel a durvaszemcsés és a finomszemcsés sávok keménységét az alapanyag szintjére sikerült csökkenteni.*

*Kulcsszavak: lézersugaras hegeztés, DP acélok, utóhőkezelés, mechanikai tulajdonságok*

*Abstract (in English) – Due to their high strength and good formability, dual-phase (DP) steels are widely used in the automotive industry as a material for body parts. Among the joining technologies, both resistance spot welding and laser beam welding are used. Depending on the welding technology, hardening and softening in the weld, and in the heat-affected zone (HAZ) can occur. Diode lasers are mainly used in the field of surface treatments and surface welding, as the size of the focused area can be varied over a relatively wide range. This advantageous property can also be used for butt welding with a point heat source, and by the adjustment of the focused area the joint can be post-weld heat treated (PWHT) with the same equipment. In the course of our experimental work, autogenous butt-welded joints were prepared from DP800, DP1000 and DP1200 material-grade fine sheets using a diode laser. During welding the size of the focused area was 2×2 mm, and during the post-weld heat treatment it was 15×6 mm. Both welding and post-weld treatment were performed with 4.6 purity argon shielding gas. The  $t_{1/5}$  cooling time was determined by thermocouple measurement. In the PWHT after welding, the aim was to temper the weld and the HAZ at 650 °C. The properties of the welded joints were analyzed by optical microscopy, tensile and hardness tests. Due to the autogenous welding, the seam proved to be a critical part of the welded joints, which can be compensated by using a filler material with the appropriate strength. Diode laser beam welding proved to be suitable for welding the investigated high-strength sheet metal. At the same time, the application of post-weld heat treatment proved to be advantageous for the HAZ, as the hardness of the coarse-grained and fine-grained zones was reduced to the level of the base material.*

*Keywords: laser beam welding (LBW), DP steels, post-weld heat treatment (PWHT), mechanical properties*

# 1. Bevezetés

A károsanyag kibocsátás csökkentése érdekében a korszerű nagyszilárdságú acélokat kedvező alakíthatósági és szilárdsági tulajdonságaik miatt előszeretettel alkalmazzák az autópárhánban [1]. A kettős-szövetű (Dual-Phase) DP-acélok a kis karbontartalmú, mikroötvözött acélok csoportjába tartoznak, elnevezésük pedig jellemzően a martenzit és a ferrit együttes jelenlétére utal a szövetszerkezetben. A kemény martenzit alapvetően a nagy szilárdságért, a lágy ferrit részek pedig a jó alakváltozóképeségért felelnek [1, 2]. A ferrit mátrixba ágyazott martenzit szigetek mellett a gyártástechnológia függvényében bénit is előfordulhat [3]. Az acéltípus jelölésében a számok a garantált minimális szakítószilárdság, MPa-ban megadott értékére vonatkoznak. A hengerlési és hőkezelési technológia eredményeként, mikroötvözők segítségével kialakuló szövetszerkezet jellemzően nagyon érzékeny a hegesztési hőbevitelre, amelynek eredményeként a mechanikai tulajdonságok jelentős romlása prognosztizálható a hőhatásövezetben [4]. A karosszéria teherviselő elemeiben megjelenő DP-acéllemezek között alkalmazott kötéstechnológiák között a pontkötések tekintetében az ellenállás-ponthegesztés [6-8] és a klincselés [9] egyaránt megjelenik, a hosszvarratokat illetően pedig a lézersugaras hegesztés [10, 11] a legelterjedtebb kötéstechnológia. Az említett technológiák közös tulajdonsága a viszonylag nagy termelékenység, amely tömeggyártás esetén az alapvető szempontok között szerepel a megfelelő kötéstechnológia kiválasztásakor. Az ellenállás- és a lézersugaras hegesztéshez egyaránt rövid hegesztési hőciklusok tartoznak hozzá, a varrat és a hőhatásövezet gyors hűtéséből adódóan pedig az eredetileg kedvező martenzit-ferrit arány a martenzit irányába tolódhat el, amelyet a hegesztett kötésben tapasztalt jelentős keményedés mutat [7, 10]. Miközben ellenállás-ponthegesztésnél, folyamatos energiabevitel esetén, alapvetően a varrat és a hőhatásövezet keményedésére lehet számítani, addig lézersugaras hegesztésnél az alkalmazott lézer hőforrás és paraméterek függvényében keményedett és lágyult sávok egyaránt előfordulhatnak a hőhatásövezetben [10]. A klincskötésekkel [9] szemben az ellenállás-ponthegesztés és a lézersugaras hegesztés előnye, hogy ezek a technológiák lehetőséget teremtenek a hegesztett kötések utóhőkezelésére, amelyek eredményeként a varrat és a hőhatásövezet repedési hajlama csökkenthető, és dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállása pedig növelhető [7, 11]. A jelen kutatómunka DP800, DP1000 és DP1200 anyagminőségű finomlemezek hozaganyag nélküli lézersugaras hegesztésére valamint utóhőkezelésére irányul, amelynek keretében optikai mikroszkóp és mechanikai anyagvizsgálatok elvégzésével elemezzük az alkalmazott technológia kötéstudajdonságokra gyakorolt hatását.

## 2. Kísérleti munka

### 2.1 Alkalmazott alapanyagok és tulajdonságaik

A kísérleti munkához a svéd SSAB által gyártott, Docol márkanéven forgalmazott, DP800, DP1000 és DP1200 anyagminőségű, 1 mm vastagságú lemezeket használtunk fel, amelyek vegyi összetételét az 1. táblázat, mechanikai tulajdonságait és a szövetszerkezetre való információkat pedig a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A kísérletek során alkalmazott alapanyagok vegyi összetétele tömegszázalékban (%)

Anyag	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
DP800	0,136	0,20	1,55	0,013	0,003	0,03	0,04	0,00
DP1000	0,132	0,19	1,50	0,010	0,003	0,03	0,03	0,00
DP1200	0,105	0,20	1,59	0,011	0,003	0,03	0,03	0,00
Anyag	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	CEV
DP800	0,010	0,000	0,01	0,046	0,016	0,0003	0,003	0,41
DP1000	0,010	0,000	0,01	0,041	0,014	0,0002	0,004	0,39
DP1200	0,010	0,030	0,01	0,042	0,000	0,0022	0,005	0,38

2. táblázat A kísérletek során alkalmazott alapanyagok mechanikai tulajdonságai és szövetszerkezete

Anyag	R <sub>p0,2</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>8</sub> , %	HV10	Ferrit arány, %	Martenzit arány, %
DP800	585	871	15,5	270	55	45
DP1000	821	1074	9,5	329	45	55
DP1200	1108	1289	4,5	386	N/A	N/A

A viszonylag csekély vegyi összetételbeli különbségekből adódik, hogy a kimagasló szilárdsági tulajdonságok alapvetően a gyártástechnológiára vezethetők vissza. Egyedül a DP1200 esetében érdemes kiemelni a bórral történő ötvözést, amely a



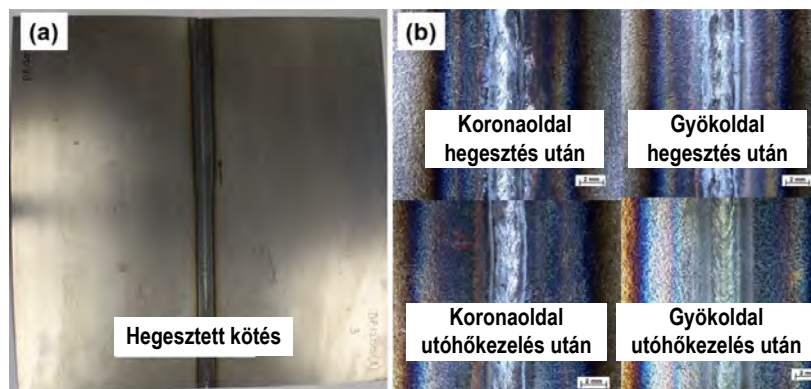
nagyobb arányú martenzit keletkezéséhez járul hozzá. A 2. táblázat adataiból szembetűnő a mechanikai tulajdonságok közül a szilárdságnövekedéssel arányosan csökkenő fajlagos nyúlás.

## 2.2 Kísérleti körülmények és alkalmazott paraméterek

A hozaganyag nélküli (autogén) tompakötések készítéséhez egyenként 300 × 150 mm-es lemezeket használtunk fel az MSZ EN 15614-11 szabványnak megfelelően. A hegesztés előtt a lemezek széleit csiszolóvászonnal tisztítottuk meg. A hegesztési kísérleteket egy Reis SRV 40 robotkarral felszerelt, 3 kW maximális teljesítményű (P), 940-980 nm hullámhossz tartományú, Laserline LDL 160-3000 dióda lézersugaras hegesztőfejjel végeztük el. Az utóhőkezelésekhez 5 kW maximális teljesítményű, 940-1060 nm hullámhossz tartományú, Laserline LDF 5000-40 diódalézer hegesztőgépet alkalmaztunk. A fókuszált terület nagyságát (d) a megfelelő varratkialakítás biztosítása céljából választottuk meg a hegesztés során. Az utóhőkezelésnél a fókuszált terület meghatározásakor arra törekedtünk, hogy a varrat és a hőhatásövezet együttes megeresztésére kerüljön sor. A kísérletekhez 4.6 (99,996%) tisztaságú argon védőgázt alkalmaztunk. Az alkalmazott hegesztési és utóhőkezelési paramétereket a 3. táblázat tartalmazza, amelyben  $v_h$  a hegesztési sebességet,  $E_v$  a fajlagos hőbevitelt (vonalenergiát) és Q a védőgáz térfogatáramot jelöli.

3. táblázat Hegesztési paraméterek lézersugaras hegesztésnél

Folyamat	d, mm	P, W	$v_h$ , mm/s	$E_v$ , J/mm	Q, l/min
hegesztés	2 × 2	1000	8	125	7
utóhőkezelés	15 × 6	275	4	69	7



1. ábra

Diódalézerrel készült DP1200 hegesztett kötés utóhőkezelés előtt és után

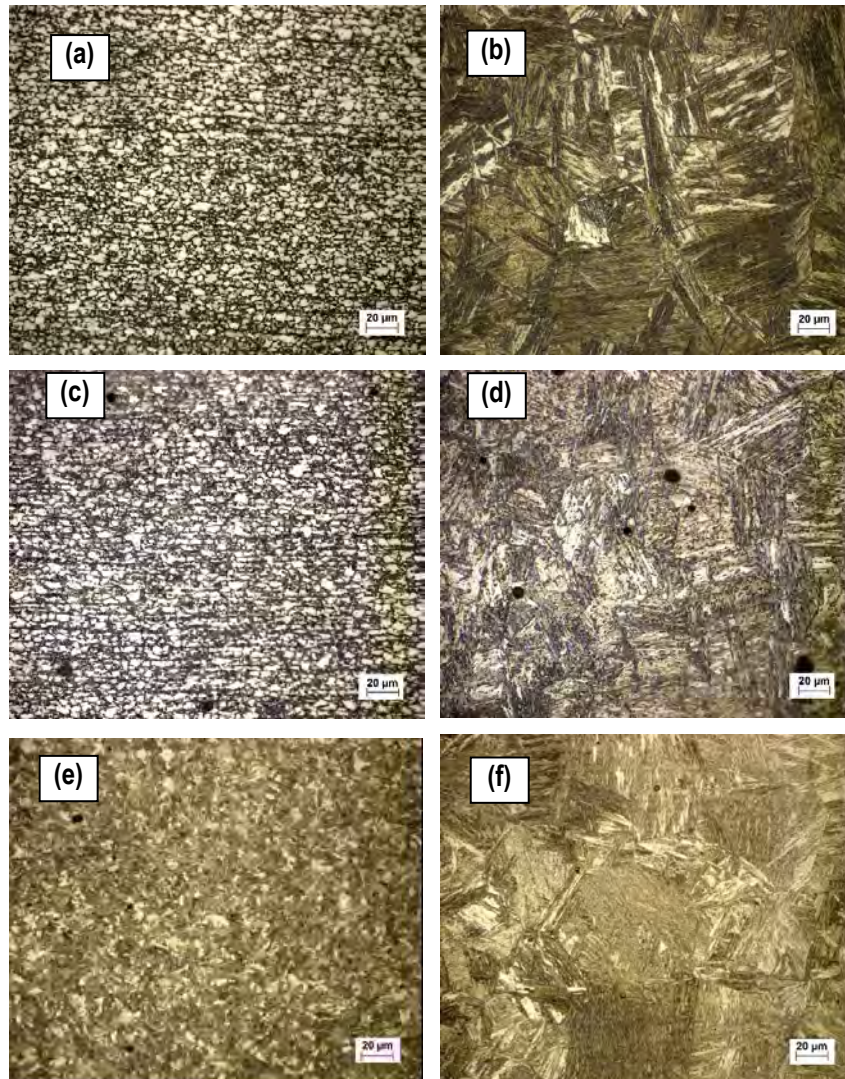
A kísérletek során termoelemes mérés segítségével elemeztük a hegesztési és utóhőkezelési hőciklust. A vizsgálatokhoz K típusú termoelemeket használtunk, amelyeket a hőhatásövezetben helyeztünk el. Az adatokat Catman 3 szoftver segítségével, 25 Hz mintavételi frekvencia alkalmazásával rögzítettük egy HBM Spider8 adatfeldolgozó eszköz felhasználásával. A mérések során átlagosan  $t_{8/5} = 2,8$  s hűlési időt mértünk, amely jellemzően rövidebb a klasszikus ívhegesztésekhez képest, ugyanakkor valamelyes hosszabb a szokásos lézersugaras hegesztéseknél, amelyek esetében akár 1 s alatti hűlési idők is előfordulhatnak. Az utóhőkezelés során arra törekedtünk, hogy a megeresztés csúcshőmérséklet 650 °C körül legyen. A hegesztett kötések közül példaként a DP1200 anyagminőségű kötésről készült felvételeket az 1. ábra tartalmazza. A diódalézerek jellemzően a klasszikus hegesztéshez használt lézerforrásokhoz képest szélesebb, a TIG-hegesztéshez hasonló sajátosságokat mutató varratot és hőhatásövezetet eredményeznek, amelynek geometriai sajátosságai a korona és a gyök oldal tekintetében jól láthatók az 1. ábrán.

## 3. Anyagvizsgálati eredmények és értékelésük

### 3.1 Mikroszkópi vizsgálatok

A hegesztett kötésből keresztirányban kimunkált csiszolatokat a köszörülés, csiszolást és a polírozást követően 2% Nital ( $\text{HNO}_3$ ) marószerezettel marattuk, majd pedig egy Zeiss Axio Observer D1m típusú mikroszkópot alkalmazásával készítettük el a

2. ábrán látható mikroszerkezeti képeket. A DP800 és DP1000 alapanyagok esetében a 2. ábra (a) és (c) részletén jól megfigyelhető a jellegzetes ferrites-martenzites szövetszerkezet, amelyben a fehér színűre maródott részek a ferritet, a sötét színűre maródott részek pedig a martenzitet mutatják.



2. ábra

Optikai mikroszkópos felvételek (2% Nital): DP800 alapanyag (a) és durvaszemcsés hőhatásövezet (b); DP1000 alapanyag (c) és durvaszemcsés hőhatásövezet (d); DP1200 alapanyag (e) és durvaszemcsés hőhatásövezet (f)

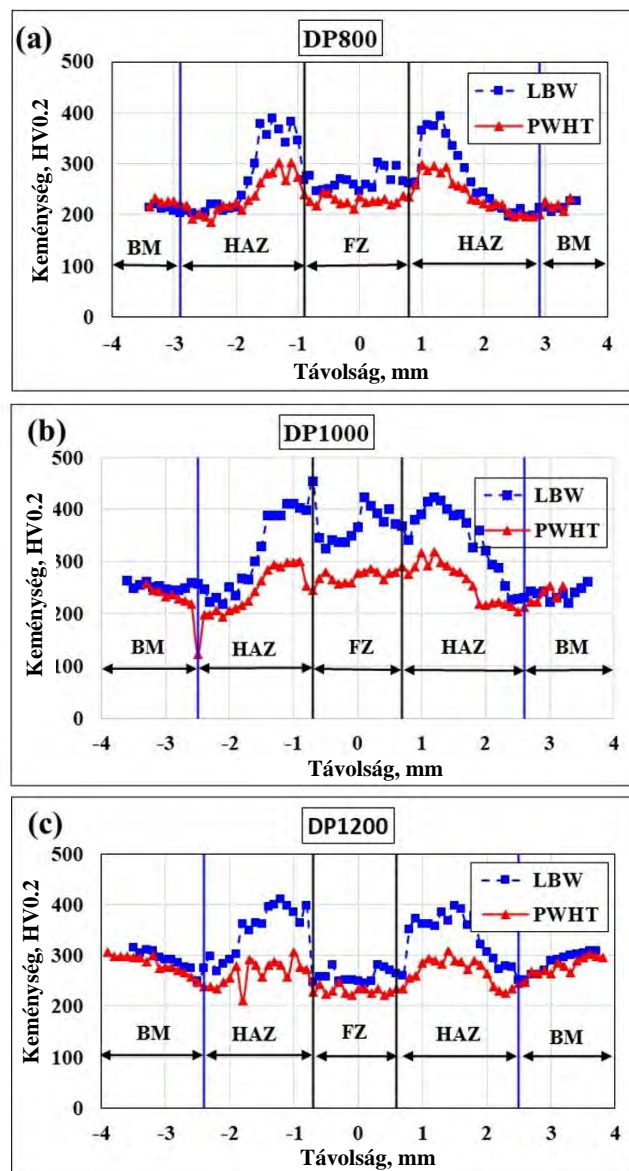
Az (e) ábrarészleten megfigyelhető, hogy a DP1200 anyagminőségénél valamelyest finomabb a szemcseszerkezet, amely nagyrészt martenzites jellegzetességeket mutat, kis mennyiségű ferrit jelenléte mellett. Az ábra jobb oldali felvételein a hőhatásövezet kritikus részének tekintett, durvaszemcsés, döntően martenzites szövetszerkezete látható.

### 3.2 Keménységvizsgálatok

A keménységvizsgálatokat a keresztirányú csiszolatokon végeztük el a Mitutoyo MVK-H1 típusú mikrokeménységmérő berendezéssel HV0,2 vizsgálati terheléssel. A lézersugaras hegesztéssel készült hegesztett kötések keménységeloszlását utóhőkezelés nélkül, és utóhőkezelést követő állapotban a 3. ábra diagramjai szemléltetik. Az autóiipari nagyszilárdságú vékonylemezek a gyártástechnológia komplexitásából adódóan az MSZ CEN ISO/TR 15608 csoportosítási rendszer egyik csoportjába sem illeszkednek be teljes mértékben. Ennek ellenére a nagyszilárdságból adódóan az eredmények értékelésénél támpontként érdemes lehet az MSZ EN ISO 15614-1 szabvány 3. acélcsoportra vonatkoztatott legnagyobb megengedett keménységet alapul venni, amely 450 HV10. Tekintettel arra, hogy a Vickers keménységvizsgálattal meghatározott értékek

viszonylag kis mértékben függnek a terhelőerőtől, ezért a HV0.2 vizsgálati terheléssel mért keménységértékek értékeléséhez megfelelőnek tekinthető ez a követelmény.

A keménységeloszlásokból látható, hogy mindhárom anyagminőség a hőhatásövezet durvaszemcsés és finomszemcsés sávjában jelentős mértékben, függetlenül a szilárdsági kategóriától, 400 HV0.2 körüli értékre keményedik, amely fokozott hidegrepedési hajlamot jelez. Az autogén varrat tekintetében az alapanyaghoz képest közel azonos keménység mérhető a DP800 és DP1000 lemezek esetében, ugyanakkor a DP1200 kategóriánál a varrat keménysége viszonylag jelentős, 40-50 HV0.2 értékkel elmarad az alapanyaghoz képest. A DP800 anyagminőségnél sem a varratban, sem pedig a hőhatásövezetben nem tapasztaltunk érdemi kilágyulást. A DP1000 esetében a hőhatásövezet interkritikus/szubkritikus tartományában figyeltünk meg keménységcsökkenést. A DP1200 esetében pedig a hőhatásövezet interkritikus/szubkritikus tartománya és a varrat egyaránt kilágyult. A hegesztést követő utóhőkezelés eredményeként a hőhatásövezetben mért keménységcsúcsokat jelentős mértékben, 300 HV0.2 körüli értékre sikerült csökkenteni, miközben a varrat keménysége, ezáltal teherviselő képessége csak minimális mértékben csökkent.



3. ábra

A lézersugaras hegesztett tompakötések keménységeloszlása utóhőkezelés előtt és után

### 3.3 Szakítóvizsgálatok

A szakítóvizsgálatokat MTS 810.23 250 kN maximális terhelhetőségű elektrohidraulikus univerzális anyagvizsgálógépen végeztük el, az MSZ EN ISO 4136 szabványnak megfelelően. Minden hegesztett kötésből 2-2 keresztirányú szakító próbatestet munkáltunk ki. A szakítóvizsgálatok eredményeit a 4. táblázat tartalmazza. A hegesztett kötések teherbíróképessége szempontjából az alapanyaghoz képest kisebb szilárdságú autogén varrat bizonyult kritikusnak. Miközben a DP800 acél esetében a hegesztett kötés szakítószilárdsága közel azonos volt az alapanyagéval, addig a DP1000 és DP1200 anyagminőségeknél a varrat szilárdsága elmaradt az alapanyagokhoz képest.

4. táblázat Szakítóvizsgálatok eredményei

Anyagminőség	Eljárás	F <sub>max</sub> , kN	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , átlag, MPa	Szakadás helye
DP800	hegesztett	10,1	780	787	varrat
		10,4	793		varrat
	utóhőkezelt	8,8	768	778	varrat
		9,0	788		varrat
DP1000	hegesztett	9,9	820	823	hőhatásövezet
		9,7	825		hőhatásövezet
	utóhőkezelt	8,8	705	710	varrat
		8,7	714		varrat
DP1200	hegesztett	8,5	772	792	varrat
		8,9	812		varrat
	utóhőkezelt	8,6	796	790	varrat
		8,5	785		varrat

## 4. Összefoglalás és következtetések

Teljes átolvadású hozaganyag nélküli hegesztett kötéseket készítettünk 1 mm vastagságú DP800, DP1000 és DP1200 autóiipari nagyszilárdságú acéllemezek között diódalézer alkalmazásával. A dióda lézer alkalmasnak bizonyult a hegesztés mellett a hegesztett kötések utóhőkezelésére, mivel ezzel a technológiával lehetőség nyílt arra, hogy a hegesztést és az utóhőkezelést ugyanazzal a hőforrással végezzük el. Következtetéseinket az alábbiakban foglaljuk össze:

1. A vizsgált anyagminőségek tekintetében a hegesztett kötések teherbíróképessége szempontjából az alapanyaghoz képest kisebb szilárdságú autogén varrat bizonyult kritikusnak, amely megfelelő hozaganyag alkalmazásával legalább részben kompenzálható.
2. A lágyulás alapvető okai között a kis mennyiségű ötvözőelem és a lézersugaras hegesztéstechnológiákon belül viszonylag nagy hőbevitelnek számító technológia szerepel.
3. A hegesztést követő utóhőkezelés alkalmazásával a hőhatásövezet durvaszemcsés és finomszemcsés részében tapasztalt keménységcsúcsok jelentős mértékben csökkenthetők mindhárom szilárdsági kategória esetén. Ebből adódóan a hegesztést követő utóhőkezelés hozzájárul a hidegrepedési hajlam csökkentéséhez.
4. Az utóhőkezelés kötéstulajdonságokra gyakorolt kedvező hatását a jövőben dinamikus vizsgálatok elvégzésével tervezzük igazolni.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka kísérleti feltételeinek biztosításáért köszönet illeti a Budai Benefit Kft-ét (<https://www.bubenlaser-hu.com/>).

## Irodalomjegyzék

- [1] Tisza M.: Autóipari anyagfejlesztések, GÉP, 71 (5-6), 2020. pp. 43-50.
- [2] Davies R.: Influence of martensite composition and content on the properties of dual phase steels, Metallurgical Transactions A, 9A (5), 1978. pp. 671–679.
- [3] Wrozyna A, Pernach M, Kuziak R, Pietrzyk M: Experimental and numerical simulations of phase transformations occurring during continuous annealing of DP steel strips, Journal of Material Engineering and Performance, 25 (4), 2016. pp. 1481–1491.
- [4] Koncsik Zs., Lukács J., Nagy Gy.: Fracture Mechanical Analysis of Gleeble Simulated Heat Affected Zones in High Strength Steels, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 66 (1), 2022. pp. 83-89.
- [6] Májlinger K., Katula L., Varbai B.: Prediction of the Shear Tension Strength of Resistance Spot Welded Thin Steel Sheets from High- to Ultrahigh Strength Range, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 66 (1) 2022. pp. 67-82.
- [7] Prém L., Bézi Z., Balogh A.: Development of complex spotwelding technologies for automotive DP steels with FEM support, Springer International Publishing, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Vehicle and Automotive Engineering, 2017. pp. 407-423.
- [8] Sahm alden Abd al, Meilinger Á: Investigation of resistance spot welded joints made on ultra-high strength steel sheets, Springer International Publishing, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Vehicle and Automotive Engineering, 2022. (megjelenés alatt)
- [9] Jónás, Sz., Kovács, P. Z.: Klincs kötések kísérleti és szimulációs vizsgálatai - A bélyeg geometriájának hatása a kötésekre, GÉP, 61 (1), 2020. pp. 35-39.
- [10] Santillan EA., Nayak SS, Xia MS, Zhou Y: Microstructure, hardness and tensile properties of fusion zone in laser welding of advanced high strength steels, Canadian Metallurgical Quarterly, 51 (3), 2012. pp. 328-335.
- [11] Sisodia, R. P.S., Gáspár, M. Draskóczy, L.: Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of DP800 and DP1200 high-strength steel butt-welded joints using diode laser beam welding, Welding in the World, 2020. pp. 671-681.

# LÉZERSUGARAS HEGESZTÉSI FOLYAMATPARAMÉTEREK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA ACÉLLEMEZEK TOMPAHEGESZTÉSE ESETÉBEN

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LASER BEAM WELDING PROCESS PARAMETERS ON THE BUTT WELDING OF STEEL PLATES

**Hareancz Ferenc**

Neumann János Egyetem

GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és

Anyagok Tanszék, 6000 Kecskemét Izsáki út 10.

hareancz.ferenc@gamf.uni-neumann.hu

*Az ipar számos területén találkozunk lézerhegesztett lemezekkel. A gyártó cégek az egymással folytatott versenyből adódóan folyamatosan fejlesztenek. Ezen fejlesztések egyik területe az optimalizálás. Vizsgálataim során a különböző lézersugaras hegesztési paraméterek hatását fogom különféle vizsgálati módszerekkel elemezni próbatesteken. A vevői elvárás és a minőségbiztosítási szempont a megfelelő varratgeometria, melyet a különböző paraméterek kombinációjával tudunk előállítani. Egyes paraméterek hatása markánsan, más paramétereké kevésbé változtatják meg a varratgeometriát. A vizsgálataim során változtatott folyamatparaméterek a következők: lézersugár teljesítmény, hegesztési sebesség, fókuszpont eltolás. Az elkészült kötések digitális fénymikroszkóppal értékelem ki. Az előkísérletek által jónak ítélt paraméterekkel további kötések készültek és a már levont következtetéseket további anyagvizsgáló eljárásokkal validálom.*

*Laser welded sheets are used in many areas of industry. Manufacturing companies are constantly improving as a result of competition between them. One area of this development is optimisation. In my investigations I will analyse the effects of different laser welding parameters on test specimens using different test methods. The customer expectation and quality assurance aspect is the right weld geometry, which can be produced by combining different parameters. Some parameters have a marked effect, other parameters have less effect on the weld geometry. The process parameters changed in my tests are: laser beam power, welding speed, focal point offset. I evaluate the welds using a digital light microscope. I will prepare further joints with parameters that are judged to be good by the preliminary tests and validate the conclusions already drawn by further material testing procedures.*

## 1. Bevezetés

A lézerhegesztés egy egyre elterjedtebb kötéstechnológia, amelyet az ipar számos területein használnak. A lézersugár hőforrás egy igen koncentrált hőbevitelt jelent, melynek hatására a kialakuló varrat alakja igen keskeny lesz. Ezáltal a hegesztett kötés hőhatásövezete is igen kis kiterjedésű, amely által a hőhatásövezetben kialakuló kritikus kilágyulások is minimális értékűek lehetnek. Sugárforrás gyártó cégek folyamatos fejlesztéseinek köszönhetően egyre jobb minőségű és teljesítményű sugárforrások jelennek meg a piacon. A sugárvezetés az egyik meghatározó pontja bármely lézersugaras technológiának, ugyanis a vezetés során keletkező veszteségek miatt kevesebb a hasznosuló teljesítmény. A berendezés gyártók a kínált technológiáikra általában biztosítanak a felhasználóknak paraméter táblázatokat például lézervágáshoz, azonban a hegesztés nem ennyire egyértelmű - sok paraméter befolyásolja a megfelelő kötéset. Általánosságban kijelenthető, hogy a lézersugárral létrehozott kötések minőségét a teljesítmény, a hegesztési sebesség és a fókuszfolt pozíciója határozza meg. A különböző technológiai paraméterekből egy előzetes kísérleti terv alapján megvizsgáltam melyek azok, amelyek a leginkább hatással vannak a varratmélységre különböző vonalenergia értékek mellett. [1, 2, 3]

## 2. Kísérleti részletek

Az előkísérletek során azonos kicsatolt teljesítmény mellett különböző eltolási sebességből számított vonalenergia értékekkel és fókuszpozíciókkal vizsgáltam a varratok mélységét. A kísérleteknél egy 4 kW lézerteljesítményű szilárdtest sugárforrást használtam. A fókuszáló lencse fókusz távolsága 200 mm. A sugárparaméter szorzat értéke 4 mm\*mrad, melyet folyamatos üzemben használtam. A sugárvezetés egy 2in1 fénykábelben keresztül történt, mely során a sugarat egy belső magban és egy

külső köpenyben lehet vezetni. Esetemben a külső 400 µm köpenyben történt. Ebből adódóan a sugár intenzitása TEM01\*, a fókusz helyzetben a foltméret 0,43 mm. A munkagázként alkalmazott hélium kiáramlási mennyisége 20 l/min volt. A vizsgálatok különböző vonalenergia értékek és fókuszpozíciókban készültek. A hegesztési varratok összehasonlítását a keresztmetszetben készített varratmélységek mérésével végeztem el.

A próbahegesztéseket egy 30 mm vastag lemezen lettek elkészítve, melyeket szalagfűrész segítségével daraboltam. A további vizsgálatok során használt 5 mm lemezvastagságú lemezt lézersugárral vágtam megfelelő méretűre [2, 4, 5, 6, 7].

A kísérlet során megkapott eredmények Taguchi módszerrel lettek kiértékelve, azért hogy látszódjanak, mely tényezők azok, amelyek hatással vannak a varratmélységre. A kísérlettervnek 2 faktora és 4 szintje van, melyek összefoglalva az első táblázatban találhatóak meg.

Faktorok	Szintek
Vonalenergia (J/mm)	37,5; 50; 75; 150
Fókusz pozíció (mm)	-3; 0; 3; 7

1. táblázat

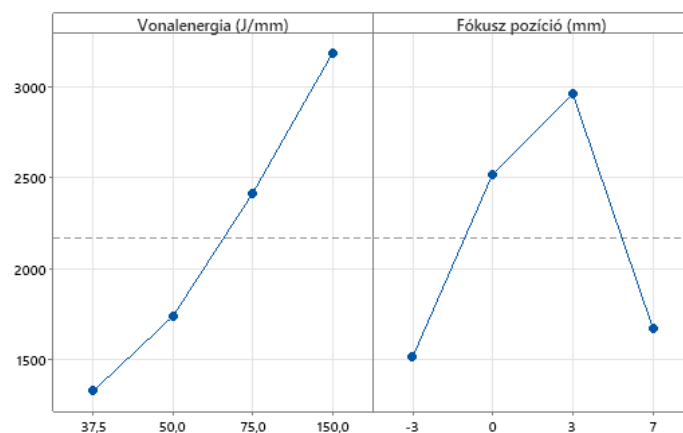
Technológiai paraméterek értékei

A vonalenergia érték 2500 W lézerteljesítményből és a különböző előtölési paraméterekből számított érték. Az előkísérletek során mért varratmélységeket a 2. táblázat tartalmazza, mely a Minitab 18 statisztikai szoftverrel kerültek kiértékelésre. A technológiai paraméterek alapján az L16 (4<sup>2</sup>) típusú kísérletterv került kiválasztásra, mivel így levonhatóak a következtetések arra vonatkozóan, hogy mely fókuszpozíció érték adja a legnagyobb beolvadási mélységet.

Sorsz.	Vonalenergia (J/mm)	Fókusz pozíció (mm)	Varratmélység (mm)
1	37,5	-3	643
2	37,5	0	1579
3	37,5	3	2244
4	37,5	7	852
5	50	-3	961
6	50	0	2298
7	50	3	2904
8	50	7	798
9	75	-3	1845
10	75	0	2797
11	75	3	3003
12	75	7	2016
13	150	-3	2611
14	150	0	3406
15	150	3	3687
16	150	7	3033

2. táblázat Varratmélységek

A szoftverben történő kiértékelés eredményeként az 1. ábrán látható diagramot kaptam.



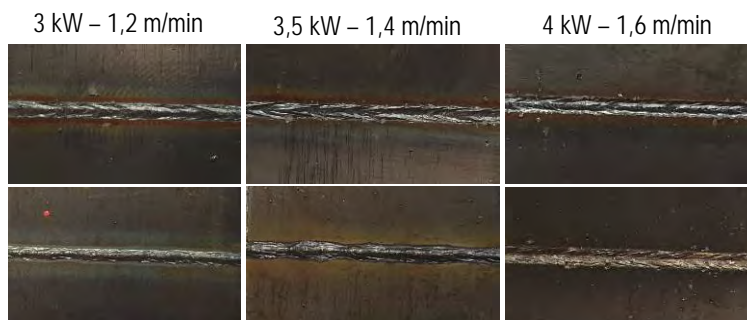
1. ábra

A varratmélységre számított hatásdiagram

Az 1. ábrán látható diagramból leolvasható, hogy a vonalenergia növelése növelni fogja a varratmélységet, viszont a fókusz pozíció növekedése esetén egy maximumot találunk.

### 3. Vizsgálatok és eredmények

Az előkísérletekkel meghatározott fókuszeltolási értékkel, amely +3 mm, további kötéseket készítettem 5 mm lemezvastagságú S235 anyagminőségű lemezek tompakötéseivel. Ebben az esetben az összehegesztendő lemez mérete 300x150 mm. A további kísérletek célja, hogy történik-e valamilyen változás abban az esetben, ha azonos vonalenergia mellett más hegesztési teljesítménnyel és előtolási sebességekkel készülnek el a kötések. Vizsgálataim során a 150 J/mm vonalenergia érték tűnt a legjobbnak. Így készítettem kötéseket 3 kW; 3,5 kW és 4 kW kicsatolt teljesítményekkel, olyan előtolási sebességekkel, hogy a számított vonalenergia érték ne változzon. A 2. ábrán az így elkészült kötések korona és gyök oldala látható. Észrevehető, hogy a kisebb teljesítménnyel készített kötés esetében a hegfürdő sokkal nyugodtabban viselkedett, mivel a fröcskölés mértéke is elhanyagolható a 4 kW teljesítménnyel szemben.



2. ábra

Hegesztési varratok korona és gyök oldala

A vonalenergia értéket tovább növeltem. Abban az esetben, amikor a 210 J/mm értékkel készítettem el a kötést a szakítóvizsgálat után a törethelyet megvizsgálva nagymértékű gázporozitás volt tapasztalható, ami a 3. ábrán látható.

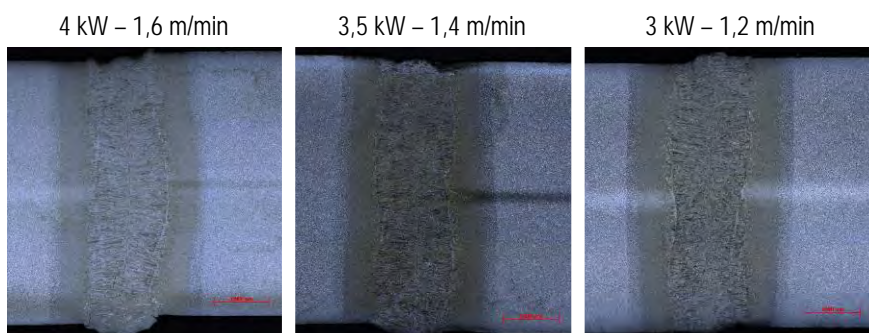




3. ábra

Porozitás a tőretfelületen

A metszeti képekhez a 20 mm sávot vágtam ki a próbalemezekből 35x20 mm méretűre egy Cuto 20 típusú precíziós vágóberendezéssel, folyamatos hűtés mellett. A mintákat Metkon Finopress melegbeágyazó készülékbe helyezve 40 mm átmérőjű korongot készítettem, melyeket a Metkon Gripo 1V csiszolóberendezés segítségével csiszoltam és políroztam. A polírozott felületeket 2 %-os nital maratószerrel marattam a szövetszerkezet láthatóvá tétele érdekében. A mintákat bemártásos módszerrel 5 másodpercen keresztül kezeltem, majd letisztítottam és meleg levegővel leszártítottam. A maratott minták képei 4. ábrán láthatóak. Az előkészített mintákról Axio Imager M2m berendezéssel készítettem képeket 50-szeres nagyításban. A 4. ábrán jól látható a hegesztendő lemezek között van némi éleltolódás, mivel lemezek hozaganyag nélkül lettek hegesztve, illetve a korona oldalon némi hiány, a gyök oldalon pedig kis mértékű kidudorodás látható. Azonban a szakítóvizsgálati eredmények alapján a kötés még így is kielégítő, ugyanis a vizsgálatok során minden esetben az alapanyagban történt próbatest szakadása.



4. ábra

Maratott minták képei

## 4. Összegzés

A kiértékelés eredményei alapján megállapítható, hogy egy +3 mm fókuszpozíció eltolás esetében érjük el a legnagyobb varratmélységet. A vonalenergia növekedése közvetlenül vonja maga után a varratmélységének növekedését. Azonban az értékének van egy maximuma, ugyanis túl nagy érték esetében a hegesztési varratban gázporozitás található. Továbbá megállapítható az is, hogyha nagyobb teljesítménnyel és magasabb előtolási sebességgel, de a vonalenergia értéket megtartva készítjük el a kötések, akkor a nagyobb teljesítmények esetében a hegfürdő sokkal nyugtalanabban viselkedik, ezáltal megnő a fröcskölés mértéke is.

## Irodalomjegyzék

- [1] Berczeli Miklós, Buza Gábor: Relationship between the keyhole laser welding and the plasma, IOP Conference Series Materials Science and Engineering 448 Paper: 012051, 2018

- [2] Berczeli Miklós, Buza Gábor: The Effect of Laser Beam Welding Parameters onto the Evolving Joints Geometry, *Materials Science Forum* 885, 2017, pp. 178-183
- [3] Berczeli Miklós: Effects of CO2 laser equipment technology parameters on different materials during cutting and engraving processes, *Perner's Contacts 2* : 19, 2019, pp. 41-47.
- [3] W. Andreasch, R. Huber, D. Mock, Two concentric fiber diameters in one laser light cable, *Laser Technik Journal* 8, 2010, pp. 38-41.
- [4] M. Zhang, G. Chen, Y. Zhou, S. Liao: Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser, *Materials & Design* 53, 2014, pp. 568-576.
- [5] W A Ayoola, W J Suder and S W Williams: Parameters controlling weld bead profile in conduction laser welding *J. of Mat. Proc. Tech.* 249, 2017, pp. 522-530
- [6] M. Vänskä, F. Abt, R. Weber, A. Salminen, T. Graf: Effect of welding parameters onto keyhole geometry for partial penetration laser welding, *Physics Procedia* 41, 2013, pp. 199-208.
- [7] Enikő Bitay: *Laser surface treatment and its modelling*, first ed., Transylvanian Museum Society, Kolozsvár, 2007 Hegesztési Szövetség Kiadó, Budapest, 2012, pp. 50-60

# LÁNGVÁGÁS HATÁSA NÖVELT SZILÁRDSÁGÚ ACÉLLEMEZEK MECHANIKAI ÉS MIKROSZERKEZETI JELLEMZŐIRE

## EFFECT OF FLAME CUTTING ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STEEL PLATES

**Kasza Gábor**

Neumann János Egyetem

6000, Kecskemét Izsáki út 10

kasza.gabor@gamf.uni-neumann.hu

**Hareancz Ferenc**

Neumann János Egyetem

6000, Kecskemét Izsáki út 10

hareancz.ferenc@gamf.uni-neumann.hu

*Nagyszilárdságú acélokat egyre több műszaki területen alkalmaznak. Elsődleges előnyük, hogy kiemelkedő szilárdsági tulajdonságaiknak köszönhetően jelentősen csökkenthető az ilyen acélból készült szerkezetek súlya, hiszen a szerkezet szilárdsági méretezéskor csökkenthető a szükséges szelvényméret. A termikus vágási eljárások közül a lángvágást főleg vastag lemezek darabolásakor alkalmazzák. Munkánk célja feltárni, hogy a lángvágás során milyen mikroszerkezeti, és ezzel összefüggő mechanikai tulajdonság változások jöttek létre az anyagban.*

*High-strength steels are used in an increasing number of engineering applications. Their main advantage is that, due to their superior strength properties, the weight of structures made of these steels can be significantly reduced, as the required section size can be reduced when sizing the structure for strength. Among thermal cutting processes, flame cutting is mainly used for cutting thick plates. The aim of our work is to investigate the microstructural and associated mechanical property changes that occur in the material during flame cutting.*

## 1. Bevezetés

### 1.1 Lángvágási technológia bemutatása

A lángvágás a termikus anyagsztésválasztó eljárások csoportjába tartozik. Az anyagsztésválasztás abban az esetben termikus, ha a technológiát meghatározó hőfolyamat a vágás közvetlen környezetében anyagszerkezeti változást hoz létre az alapanyagban.

Lángvágás során a kialakult felület minősége több tényezőtől függ, mint például a vágási sebesség, az alkalmazott gázok fajtája és nyomása, a vágóoxigén és az égőgáz mennyisége, valamint elengedhetetlen, hogy a vágott anyag felülete megfelelő tisztaságú, azaz rozsdá és szennyeződés mentes legyen. [4] [6]

A lángvágás folyamata: Lángvágás során a megfelelően kiválasztott égőgáz és a hozzá adagolt oxigén keverékét hevítő lángnak nevezzük, melynek szerepe, hogy az alapanyagot gyulladási hőmérsékletre hevíti. A gyulladási hőmérsékletnek mindig alacsonyabbnak kell lennie az alapanyag olvadáspontjánál. A gyulladási hőmérsékletre felhevített alapanyag felületére nagynyomású oxigénsugarat bocsátanak, melyet vágóoxigénnek nevezünk. A hevítő lánggal kibocsátott hő és az égetés során keletkező égéshő együtt tartja fent a vágóoxigénnel végzett égetési folyamatot. Az alapanyag elégetését a vágórésből való kifúvatása követi, a keletkezett oxidokat és olvadt fémet a nagynyomású vágóoxigén mozgási energiája távolítja el a vágórésből. [1] [5]

A lángvágás létrejöttének különböző feltételei vannak, mivel nem minden fém vágható lánggal. A legfontosabb feltétel, hogy a vágandó anyag oxigénben éghető legyen, továbbá az alapanyag gyulladáspontja alacsonyabb legyen az olvadáspontjánál, és az égetés során keletkezett égéstermék, azaz salak híg folyós legyen, és annak olvadáspontja kisebb legyen az alapanyag olvadáspontjánál. [2]

### 1.2 Alapanyag bemutatása

A nagyszilárdságú acélok mechanikai tulajdonságai akár két-háromszor kedvezőbbek, mint az S355 szerkezeti acélnak. A kedvezőbb szilárdság széleskörű felhasználási területet biztosít, a kisebb szelvényméret okozta önsúly csökkenés pedig az

anyag és gyártási költségek csökkenéséhez vezet. Felhasználási területe nagy igénybevételnek kitett acélszerkezetek, pl. darugékek, keretszerkezetek, emelő- és földmunkagépek. [3] [7]

A felhasznált alapanyag minősége S690QL nagyszilárdságú acéllemez, melynek táblázatba foglaltuk kémiai összetételét (1. táblázat), és mechanikai tulajdonságait (2. táblázat).

1. táblázat S690QL kémiai összetétel

C%	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V
max 0.2	max 0.8	max 1.7	max 2	max 0.02	max 0.01	max 1.5	max 0.7	max 0.12

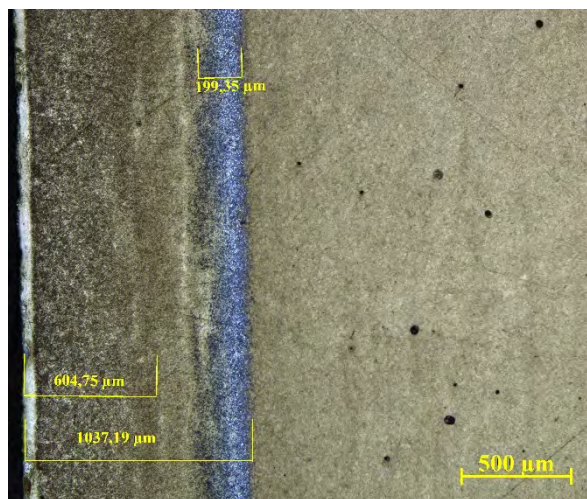
2. táblázat S690QL mechanikai tulajdonságai

Jelölés	Névleges vastagság (mm)	Szakítószilárdság (MPa)	Minimum folyáshatár (MPa)	Ütőmunka (J)	Nyúlás (%)
S690QL	3-50	770-940	690	0 °C - 50 -20 °C - 40 -40 °C - 30	14

Kutatásunk során felhasznált alapanyag egy 150x150 mm alapterületű, 30 mm lemezvastagságú, acél tömb, melyet a táblalemezből lángvágással vágott ki a gyártó.

## 2. A kísérlet és vizsgálat leírása

A lángvágáshoz égőgázként propán-butánt alkalmaztak. A gáz égési sebessége 3,3 m/s. 25-40 mm vágási tartományon a vágó sebesség 5,6-6,8 mm/s. Propán égésekor a láng hőmérséklete körülbelül 2810 °C. Az oxigén és az égőgáz aránya 4,3:1. Pb gázt elsősorban vastag lemezek vágásakor alkalmaznak, 30 mm lemezvastagság esetén acetilén gáz használata alkalmasabb lenne, ezért a kutatásunk későbbi szakaszában vizsgálni fogjuk az acetilén és a propán-bután égőgázok használatának különbségét vastag, illetve vékony lemezek esetén. A kutatásunk során vizsgált alapanyagok vastagsága 25-100 mm.



1. ábra

Mikroszkóp vizsgálat 50-szeres nagyításon

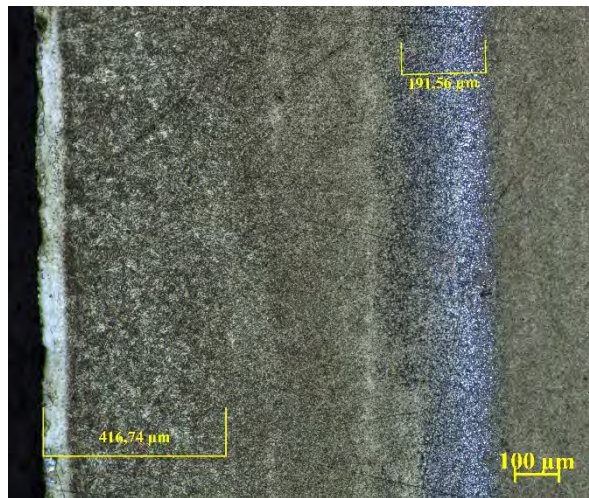
Az alapanyagot szalagfűrészsel kezdtük el darabolni, és minden vágás során hűtőfolyadékot alkalmaztunk. Először egy 20 mm széles hasábot vágunk le, majd ezt tovább daraboltuk úgy, hogy az előző vágásra merőlegesen, a hasáb szélétől 65 mm-re egy 20 mm széles hasábot vágunk le, melynek méretei 20x20x30 mm. A további darabolást Cuto 20 típusú precíziós

vágóberendezésen végeztük el, ahol 20x20x10 mm-es mintákat vágunk le, és az eljárás során hűtőfolyadékot is használtunk. A darabok alapanyagból történő kivágását úgy terveztük meg, hogy azok egyik oldala a gyártó által létrehozott lángvágott felület, ennek a tényezőnek a későbbi vizsgálataink során nagy jelentősége van.

Ezeket a mintákat Metkon Finopress melegbeágyazó készülékbe helyeztük és elvégeztük a beágyazást, valamint a lángvágott oldalaknál jelölő tollal jelzést helyeztünk a pogácsákra. Az elkészült darabokon csiszolás és polírozás műveletet végeztünk el Metkon Gripo 1V csiszoló berendezés segítségével.

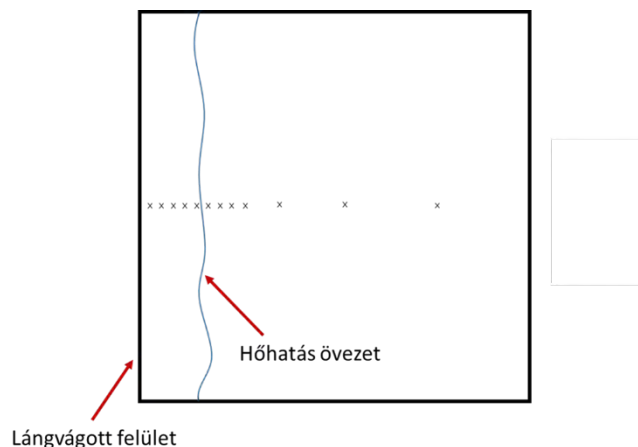
A vizsgálandó felületet 2%-os nital savval marattuk. A maratószeret edénybe töltöttük és a maratószerbe mártva 45 másodpercig mozgattuk, majd rögtön folyó vízzel leöblítettük, ezután metanollal lemostuk a maratott felületet. Meleg száraz levegővel végeztük a szárítást. A maratás sikerességét egy szabad szemmel is látható, kék színű vékony sáv jellemezte (1. ábra), mely az alapanyag lángvágott oldalától 1 mm-re jelent meg a csiszolaton.

Az előkészített mintákon először mikroszkóp vizsgálatot alkalmaztunk Axio Imager M2m berendezés segítségével, 50-szeres, 100-szoros (2. ábra), és 200-szoros nagyításon. A mikroszkópi képeken látható, hogy a lángvágás hőhatás övezete a lángvágott oldaltól körülbelül 1 mm-ig terjed, ezt szemlélteti a képeken is látható kék sáv mely a hőhatási övezet széle, ettől mélyebre haladva az anyagban már az alapanyag szövetszerkezete látható.



2. ábra

Mikroszkóp vizsgálat 100-szoros nagyításon



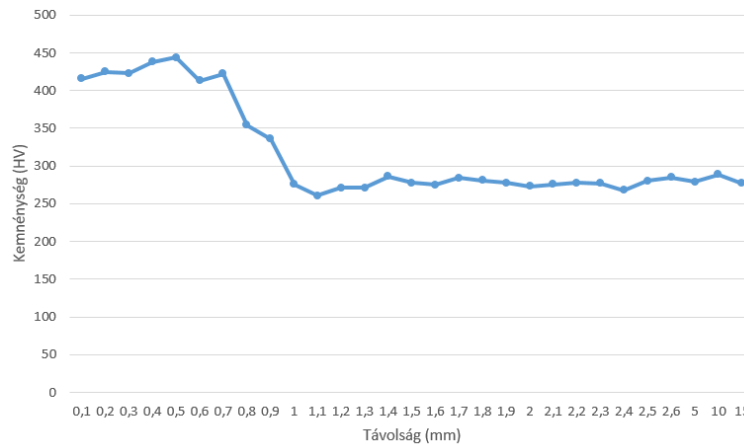
3. ábra

Micro Vickers keménységmérés lenyomatok elvi elhelyezkedése

Micro Vickers keménységmérést végeztünk Wilson Wolpert 401MWD keménységmérő gépen MSZ EN ISO 6507-1:2006 szabvány szerint. Két szomszédos lenyomat egymástól legalább 2,5d távolságban helyezkedhet el, így mi 0,1 mm távolságot választottunk, mely megfelel ennek a kritériumnak. Az első lenyomatot a minta szélétől szintén 0,1 mm távolságra helyeztük

el, és a szélétől számítva 2,6 mm-ig készítettünk lenyomatot, mert ekkor már nem tapasztaltunk változást az anyag keménységében. Ellenőrzésként további 3 lenyomatot készítettünk a minta szélétől számítva 5, 10, és 15 mm-re. A lenyomatok elhelyezkedését elvi ábrán szemléltettük. (3. ábra) Terhelési idő 12 másodperc volt. Méréseinket a lángvágott felülethez igazítva végeztük el, hiszen kutatásunk célja kideríteni, hogy a lángvágás során létrejött hőhatás övezetben milyen mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonság változások jöttek létre.

A keménységmérési vizsgálat eredményeit grafikonon szemléltettük (4. ábra), mely alapján látható, hogy a hőhatás övezet a lángvágott oldaltól számítva nagyjából 1-1,5 mm-ig terjed. 0,5 mm távolságon növekszik, majd 1 mm-re haladva a lángvágás vonalától lecsökken a keménység. A lángvágástól számítva körülbelül 1,5 mm-re az anyag keménysége állandó értéket ér el, 260-280 HV, tehát ez már az alapanyag keménysége.



4. ábra

Micro Vickers keménységmérés eredménye

### 3. Összegzés

A mérési eredmények szemléltetik, hogy a lángvágás során az alapanyaggal közölt hőmennyiség, a vágás vonalától számított 1-1,5 mm távolságban okozott mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonság változást az anyagban. A gyártóval közös megegyezés alapján az alapanyagról a vágás vonala mentén, forgácsolási eljárással el kell távolítani ezt a megváltozott mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonságokkal rendelkező réteget, az acél további biztonságos felhasználása érdekében. További metallográfiai illetve keménységmérő vizsgálatok készítésén jelenleg is dolgozunk, valamint az eredményeinket és megállapításainkat ütmunka vizsgálattal is alá fogjuk támasztani. A meglévő mérési eredmények 30 mm lemezvastagságú alapanyagból kivágott mintákon készültek. Kutatásunk következő szakaszában 25, 40, 60 és 100 mm lemezvastagságú alapanyagot is feldolgozunk majd, annak érdekében, hogy kiderítsük a lemez vastagságának változása milyen módon befolyásolja a hőhatás övezetben, a mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonságokat.

### 4. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely a 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00075 „Növelt szilárdságú szerkezeti anyagok hatékony megmunkálási technológiáinak kifejlesztése a Ferropatent Zrt.-nél” pályázat keretében valósult meg.

### Irodalomjegyzék

- [1] Dobránszky János, Varbai Balázs: A hegesztés és a rokon gyártási eljárásai a fémek technológiájában (Kiadó: DyTh Bt., 2021, 26)

- [2] Raphaël Thiébaud, Jean-Marie Drezet, Jean-Paul Lebet: Experimental and numerical characterisation of heat flow during flame cutting of thick steel plates (Journal of Materials Processing Technology, 2013, 2)
- [3] Ho-Cheung Ho, Kwok-Fai Chung, Ming-Xin Huang, David A. Nethercot, Xiao Liu, Hao Jin, Guo-Dong Wang, Zhi-Hong Tian: Mechanical properties of high strength S690 steel welded sections through tensile tests on heat-treated coupons (Elsevier Ltd., 2019, 1)
- [4] L. E. Lindgren, A. Carlestam, M. Jonsson: Computational Model of Flame-Cutting (Journal of Engineering Materials and Technology, 1993, 1)
- [5] Patricia Muñoz-Escalona, Maria Carolina Payares, Minerva Dorta, and Ronald Diaz: Analysis and Influence of Acetylene and Propane Gas During Oxyfuel Gas Cutting of 1045 Carbon Steel (Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 1-2)
- [6] X. Huang, F. Xi, J. Li, Z. Zhong: Optimal layout and path planning for flame cutting of sheet metals (International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2008, 1)
- [7] Dr. Kövesdi Balázs: Nagyszilárdságú acélok a hídépítésben (Budapest, 2018, 3-4)

# S1300 NAGYSZILÁRDSÁGÚ SZERKEZETI ACÉL HUZALELEKTRÓDÁS VÉDŐGÁZOS ÍVHEGESZTÉSE

## GAS METAL ARC WELDING OF S1300 HIGH STRENGTH STRUCTURAL STEEL

**Kovács Judit**

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-  
Egyetemváros

metkjudit@uni-miskolc.hu

**Lukács János**

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc-  
Egyetemváros

janos.lukacs@uni-miskolc.hu

A nagyszilárdságú acélok napjaink szerkezeti alkalmazásaiban meghatározó szerepet töltenek be. A különböző hegesztett szerkezetekben alkalmazott acélok a fejlesztések révén mára már eljutottak az 1000 MPa folyáshatárt is meghaladó, ultra-nagyszilárdságú szerkezeti acélokig. Ezen acélok alkalmazása során jelentős a szelvényméret csökkenés, továbbá az ebből adódó kisebb varrat tömeg által csökken a hozaganyagszükséglet, a gyártási idő és a gyártáshoz szükséges energia. A tömeg csökkenéséből származó előnyök kihasználhatók mozgó szerkezetek (például daruk) esetén. A nagy folyáshatárt makro- és mikroötvözők alkalmazásával, termomechanikus hengerléssel, hőkezeléssel, illetve az anyagban található szennyezők csökkentésével érik el. Ezért, az ilyen acélok hegesztésekor, különös figyelmet kell fordítani arra, hogy a gyártás során létrehozott, többnyire nem egyensúlyi anyagszerkezetet minél kevésbé változtassuk meg. Ez mély anyagtudományi ismereteket, korszerűbb hegesztéstechnológiát és modernebb hegesztő berendezéseket igényel. A hegesztés – a hőbevitelből adódóan – megváltoztatja az alapanyag eredeti szövetszerkezetét, így gyakran teljesen eltérő mechanikai tulajdonságokat kapunk, ami a hegesztett szerkezet szempontjából sok esetben nem megengedhető. Tekintettel arra, hogy a hegesztett kötések tulajdonságai eltérnek az alapanyagétól, indokolt azok vizsgálatára kiemelt figyelmet fordítani. A különböző hegesztési paraméterek meghatározzák a kötés minőségét, illetve a kötés – és ezáltal a hegesztett szerkezet – igénybevételekkel szembeni ellenállását is. Jelen kutató munka során hegesztési kísérleteket végeztünk egy nagyszilárdságú szerkezeti acélon, annak érdekében, hogy megvizsgálhassuk a hegesztés szövetszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt befolyásoló hatását. A felhasznált nagyszilárdságú szerkezeti acél folyáshatára 1300 MPa, vastagsága 10 mm, a hegesztéshez alkalmazott eljárás pedig huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés volt. A kötés kialakításához Union X96 (undermatching) és alform 1100 L-MC (undermatching) típusú, 1,2 mm átmérőjű hozaganyagot használtuk. A kötés létrehozása során a  $t_{8/5}$  hűlési időt szabályoztuk, amelyet korábbi fizikai szimulációs kísérletek és irodalmi ajánlások figyelembevételével 5 s-ra választottunk. A hegesztéshez alkalmazott technológiai paramétereket a megválasztott hűlési idő alapján határoztuk meg. A kötések elkészítése után optikai mikroszkópos és keménységvizsgálatokat végeztünk.

Nowadays, high strength steels play a key role in structural application. The yield strength of structural steels used in various welded structures has developed to exceed 1000 MPa. The application of these steels results a significant reduction in the required section size and, due to the resulting lower weld mass, there is a reduction in the amount of filler metal needed, production time and energy required for manufacturing. The benefits of the weight reduction can be exploited for moving structures (e.g. cranes). High yield strength is achieved by the use of micro and macro elements, thermomechanical rolling, heat treatment and reduction of impurities in the material. Therefore, during welding for such steels special attention must be paid to minimizing the changes in the material structure which is often not equilibrium. This requires deep knowledge of materials science, advanced welding technology and modern welding equipment. Welding, due to the heat input, changes the original microstructure of the material, often resulting completely different mechanical properties, which in many cases are not acceptable for the welded structure. Given that the properties of welded joints are different from the properties of the base material, so it is important to pay more attention to their testing. The different welding parameters determine the quality of the joint and the resistance of the joint, and thus the welded structure, to load. In the present research work welding experiments were carried out on a high strength structural steel to investigate the influence of welding on microstructure and mechanical properties. The experiments were made on a high strength steel with yield strength 1300 MPa having 10 mm thickness welded by gas metal arc welding. Union X96 and alform 1100 L-MC type filler metals (undermatching condition) with a diameter of 1.2 mm were used. During the welding experiments the  $t_{8/5}$  cooling time was regulated. Based on our former investigations (physical simulations on the examined material) and recommendations in the literature, the chosen  $t_{8/5}$  cooling time was 5 s. The welding parameters were determined based on the chosen cooling time. After welding optical microscope and hardness tests were performed.

## 1. Bevezetés

A nagyszilárdságú acélok egyre fontosabb szerepet töltenek be a különböző műszaki alkalmazásokban, különösen a jármű- és közlekedési iparban. Az elmúlt évtizedekben, az ötvöző és mikroötvöző elemek mellett, a hengerlési és a hőkezelési eljárások kombinálásával, különböző nagyszilárdságú acélokat fejlesztettek ki, amely eredményeként napjainkban már



1300 MPa feletti folyáshatárral rendelkező vastaglemezek is vannak forgalomban [1-7]. A nagyszilárdságú acélok alkalmazásának számos előnye lehet. Ezen acélok felhasználásával vékonyabb, könnyebb, de erősebb szerkezetek építhetők, ami mozgó szerkezetek esetén különösen előnyös. A kisebb keresztmetszet, kisebb anyagigényt jelent az alapanyagok és a hozaganyagok oldalán egyaránt, ezáltal a gyártási idő és a gyártási költségek is csökkenhetnek. A végeredményben kisebb szerkezet tömeg az üzemeltetés során energia-megtakarítást eredményez [8-12]. Ugyanakkor, a növelt szilárdság és a szerkezet működése által megkívánt szívósság egyensúlyának a megteremtése, illetve az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállás biztosítása [13], a szerkezet integritása szempontjából [14-15], komplex megközelítést igényel.

Jó mechanikai tulajdonságai és potenciális előnyei ellenére a nagyszilárdságú acélok hegesztése még mindig tartogat kihívásokat; főként a megfelelő hegesztéstechnológia és a technológiai paraméterek kiválasztása terén. A fajlagos hőbevitel és a hűlési sebesség a két legfontosabb paraméter, amelyek befolyásolják a kötés teherbírását, alakváltozó képességét és szívósságát. Mivel a hegesztett kötés különböző részeit eltérő hőhatás éri, a hőhatásövezet különböző részei is eltérő tulajdonságúak. Nagyszilárdságú acélok esetén a hőhatásövezetben bekövetkező lágyulás és szívósság csökkenés a legmeghatározóbb. Ezen acélok hegesztésekor szintén problémát okozhat a hidegrepedés (érzékenység) is. Emellett, a nagy folyáshatár miatt, megjelenik a hozaganyag-választás örök dilemmája, mivel még csak 1100 MPa folyáshatárú anyagokhoz lehet „matching” típusú hozaganyagot beszerezni [1,8,9,16-20].

Jelen kutatómunkában S1300 típusú nagyszilárdságú acélon, két különböző szilárdsági kategóriába tartozó hozaganyaggal létrehozott hegesztett kötések tulajdonságait vizsgáljuk (optikai mikroszkópos, és Vickers keménységvizsgálatok alapján) és ezen vizsgálatok eredményeit hasonlítjuk össze és mutatjuk be.

## 2. Felhasznált anyagok és alkalmazott technológiák

A kísérletekhez alkalmazott, 10 mm vastagságú alapanyag mechanikai tulajdonságainak mért értékeit az 1. táblázat, kémiai összetételének mért értékeit pedig a 2. táblázat tartalmazza. Mivel a vizsgálat alapanyaghoz műbizonylat nem állt rendelkezésünkre a mechanikai tulajdonságok meghatározása és a vegelemzés a Miskolci Egyetemen történt.

1. táblázat A vizsgált acél mechanikai tulajdonságai

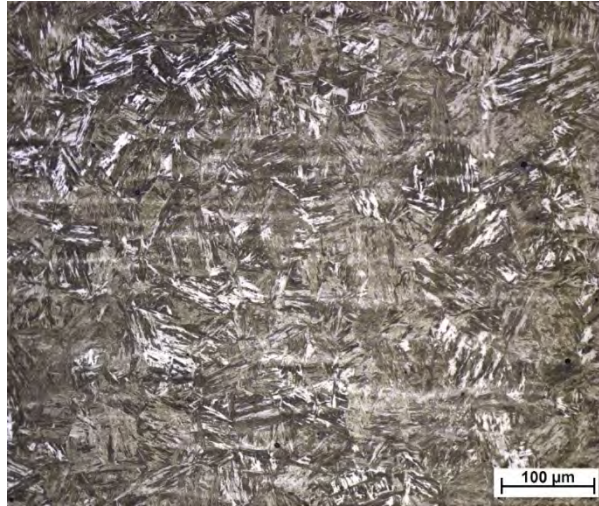
Keménység HV10	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	KV -40 °C-on [J]
468	1300	1560	12	78

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
0,23	0,45	1,86	0,012	0,001	0,85	0,093
Ni	Mo	V	Ti	Al	Nb	Zr
2,43	0,360	0,030	0,002	0,063	<0,001	<0,001

A mért kémiai összetétel alapján, az MSZ EN 10025-1:2005 [21] szabvány szerint meghatározott módon számított karbonegyénérték: CEV = 0,956%.

A vizsgált nemesített nagyszilárdságú acél szállítási állapotában Zeiss Observer D1 m optikai mikroszkóppal készült felvételén N = 200x-os nagyításban figyelhető meg az 1. ábrán az acél megeresztett martenzites szövetszerkezete. A próbatest maratása Nitál (3%-os alkoholos HNO<sub>3</sub>) segítségével történt.



1. ábra

Az alapanyag szövetszerkezete, N = 200x, marószers: 3% HNO<sub>3</sub>

A hegesztési kísérletekhez „undermatching” típusú, Böhler gyártmányú, Union X96 és alform 1100 L-MC jelű, 1,2 mm átmérőjű hozaganyagokat használtunk. Az alkalmazott hozaganyagok műbizonylatokban szereplő mechanikai tulajdonságait a 3. táblázat, a kémiai összetételét pedig a 4. és az 5. táblázatok tartalmazzák.

3. táblázat Az alkalmazott hozaganyagok mechanikai tulajdonságai

A hozaganyag jele	R <sub>eL</sub> /R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	KV -50 °C-on [J]
Böhler Union X96	≥930	≥980	≥14	≥47
Böhler alform 1100 L-MC	≥1100	1140-1250	≥10	≥27

4. táblázat A Böhler Union X96 hozaganyag (melegen hengerelt huzal) kémiai összetétele [tömeg%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Ti	Al	Zr
0,1	0,8	1,94	0,015	0,011	0,52	0,53	2,28	<0,01	0,06	0,06	<0,01	<0,01

5. táblázat Böhler alform 1100 L-MC hozaganyag (varrat) kémiai összetétele [tömeg%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,08	0,46	1,54	0,01	0,007	0,64	0,52	2,73	0,22

A hegesztési paraméterek meghatározása a hűlési idő figyelembevételével történt. Mivel az acélok mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolja a t<sub>8/5</sub> hűlési idő, ezért a paraméterek meghatározása előtt hőhatásvezetési vizsgálatokat végeztünk a Gleeble 3500 fizikai szimulátor segítségével. A vizsgált hőhatásvezetési sávok kiválasztásánál a cél az volt, hogy a legkisebb szívóssággal rendelkező sávokat állítsuk elő, ezért a választás a durvaszemcsés (DSZ), az interkritikus (IK) és – a komplex hőhatásvezetési sávok közül – az interkritikus durvaszemcsés (IKDSZ) sávra esett. Ahhoz, hogy szimulálni tudjunk egy kis, egy közepes és egy nagy fajlagos hőbevitellel történő huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést, a vizsgálatok során három különböző hűlési időt állítottunk be. Ez alapján a választott hűlési idő értékek: t<sub>8/5</sub> = 5 s, 15 s és 30 s voltak.

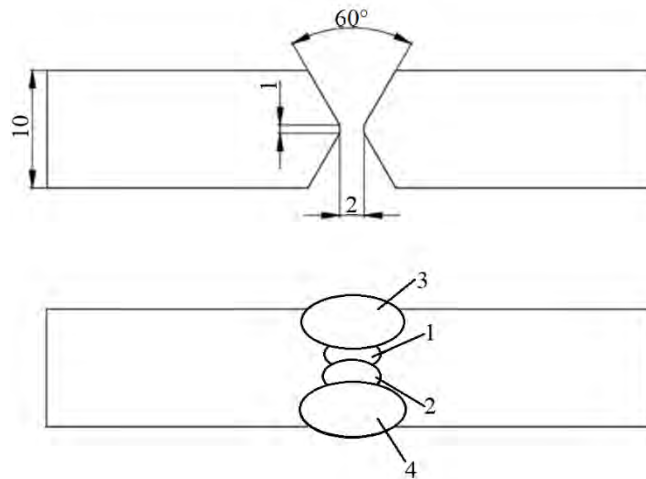
A fizikai szimulációs vizsgálatok után optikai mikroszkópos, keménység és műszerezett ütővizsgálatokat végeztünk. A keménység vizsgálatok eredményei alapján a vizsgált acél a hőciklusok hatására kilágylt, a hőhatásvezetési sávok keménysége egyik esetben sem érte el az alapanyag keménységét. A hűlési idő növelésének negatív hatása az interkritikus (IK) sávban számottevő volt. Az ütővizsgálatok eredményei alapján a hőhatásvezetési sávok jelentős ridegedése volt megfigyelhető. A t<sub>8/5</sub> hűlési idő növelésekor csökkent az ütőmunka értéke.

A fizikai szimulációs vizsgálatok eredményei és a szakirodalmi ajánlások figyelembevétele alapján a választott  $t_{8/5}$  hűlési idő 5 s volt. A hegesztési paramétereket, mindezek ismeretében, a választott hűlési idő alapján határoztuk meg (6. táblázat).

6. táblázat A kísérletek során alkalmazott hegesztési paraméterek

Sor	Áramerősség [A]	Feszültség [V]	Hegesztési sebesség [cm/min]	$t_{8/5}$ hűlési idő [s]	Fajlagos hőbevitel [J/mm]
Gyök	180	19,1	31	5	562
Takaró	240	22,7	53		493

A 350x150x10 mm-es lemezeket huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel, PA pozícióban egyesítettük, Daihen WB-P500L típusú áramforrás segítségével. A lemezek X leélezését, valamint a sorokat a 2. ábra szemlélteti. A hegesztési sebesség és az egyenletes varratképzés biztosítása érdekében (az első gyöksor kivételével) a pisztolyt ESAB Miggytrac B5001 típusú hegesztő traktorral mozgattuk. Az előmelegítési hőmérséklet 100 °C volt, a rétegek közötti hőmérséklet, pedig megközelítőleg 130 °C. Az alkalmazott védőgáz M21 típusú (80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>) védőgáz keverék volt, 18 l/min áramlási sebességgel.

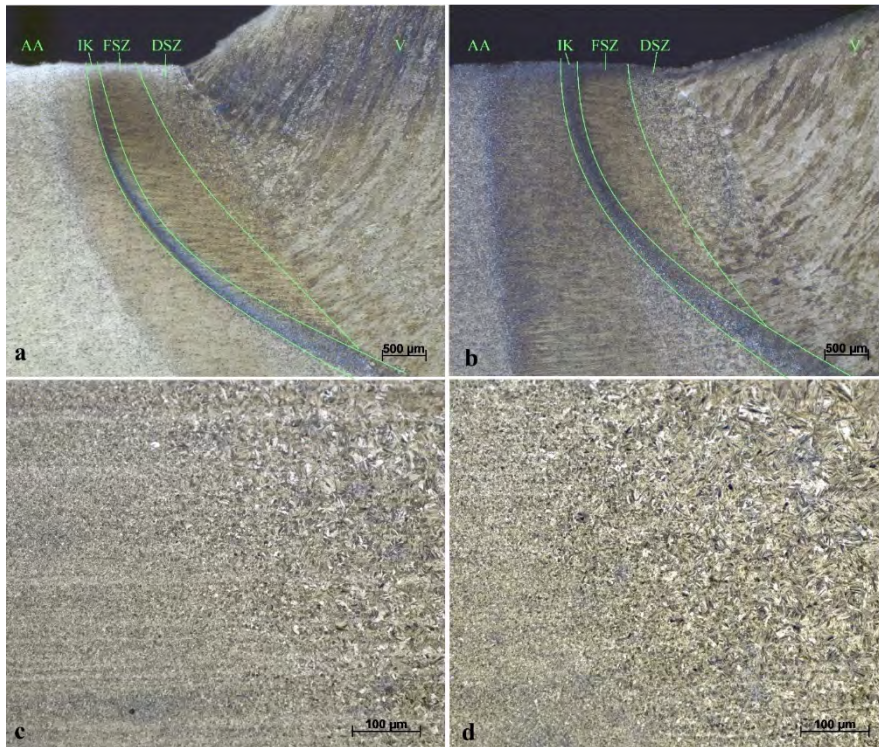


2. ábra

Sematikus ábra a kötéskialakításról és a varratsorokról

### 3. Vizsgálati eredmények

Hegesztés után próbatesteket munkáltunk ki optikai mikroszkópos és keménység vizsgálatokhoz. A próbatestek előkészítése után az optikai mikroszkópos vizsgálatokat Zeiss Observer D1 m optikai mikroszkóp segítségével végeztük. A kötésről készült szövetszerkezeti képek a 3. ábrán láthatók, amelyen az a és a c jelű képek a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötésről, a b és a d jelzésű képek pedig a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötésről készültek.



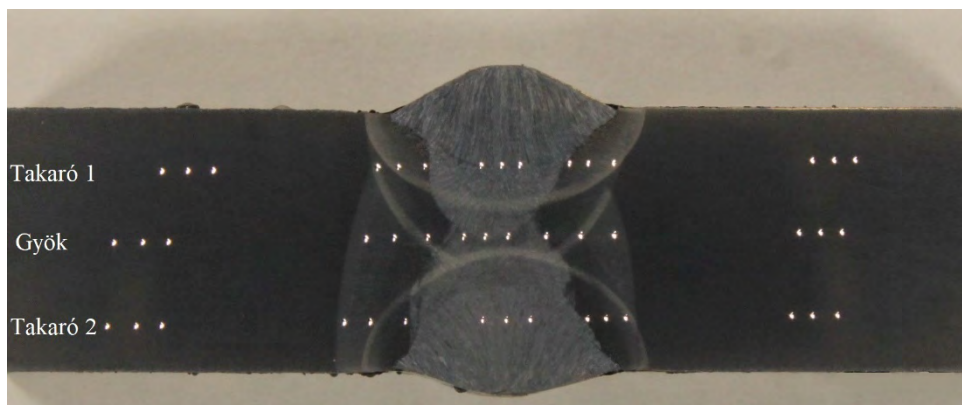
3. ábra

A hegesztett kötés optikai mikroszkópos képei, marószers: Nital (3% HNO<sub>3</sub>)

AA = alapanyag, IK = interkritikus hőhatásövezeti sáv, FSZ = finomszemcsés hőhatásövezeti sáv,  
DSZ = durvaszemcsés hőhatásövezeti sáv, V = varrat

Az optikai mikroszkópos felvételek alapján a hegesztett kötések szövetszerkezetében nincsenek számottevő különbségek a hasonló hőbevitel és hűlési idő következtében. A 3. a és b ábrarészletek alapján a különböző hőhatásövezeti sávok szélessége is hasonló. Az alkalmazott hozaganyagok eltérő összetétele miatt kismértékű különbség látható a varratfémekben. (A maratás miatt a két különböző kötés színeiben látható némi eltérés.)

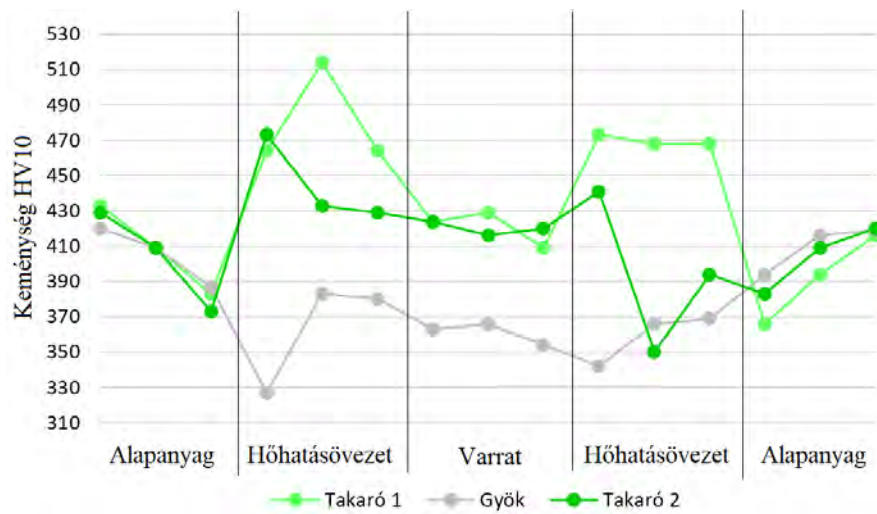
A próbatesteken a Vickers (HV10) keménységvizsgálatokat Reicherter UH 250 típusú, univerzális, mikrokeménység mérő berendezéssel végeztük. Mindkét kötés esetén három különböző részen (három sorban) mértük keménységet, a 4. ábrán látható elhelyezkedés szerint.



4. ábra

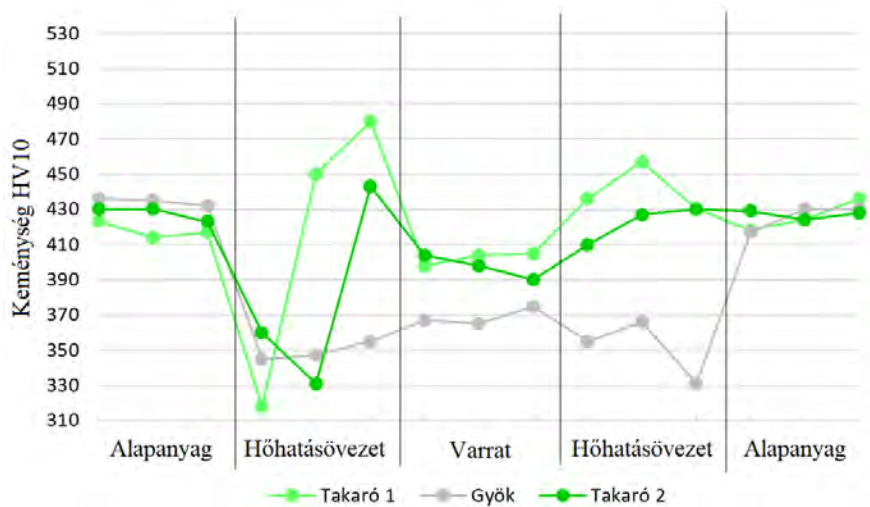
A keménységmérés pontok elhelyezkedése

A két különböző kötésen mért keménység értékek az 5. és a 6. ábrákon láthatók.



5. ábra

Keménység eloszlás a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötés esetén



6. ábra

Keménység eloszlás a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötés esetén

Az MSZ CEN ISO/TR 15608:2021 szabvány [22] alapján az általunk vizsgált nemesített nagyszilárdságú acél a 3.2 csoportba tartozik. Az ISO 15614-1:2017(E) szabvány [23] előírásai alapján a 3. csoportba tartozó, utólag nem hőkezelt acélok megengedett maximális keménység értéke 450 HV10. Ugyanakkor, az olyan acélok esetén, ahol  $R_{eH} > 890$  MPa, ettől eltérő értékek is megengedettek lehetnek. Jelen esetben, ahogyan az az 5. és a 6. ábrákon is látható, a hőhatásövezet egyes részein a keménység meghaladja a 450 HV10 értéket. A szabványban egyéb kiegészítés nem található arra vonatkozóan, hogy nagyobb folyáshatárú acélok (mint például az általunk vizsgált 1300 MPa folyáshatárú acél) esetén milyen értékek tekinthetők elfogadhatónak. Az ábrákon jól látszik, hogy a hőhatásövezet egyes részein akár 200 HV10 különbség is előfordulhat a mért

értékek között. Az is megfigyelhető továbbá, hogy minkét varrat esetén a gyöksorban mért keménység értékek kisebbek (mind a varratfémekben, mind a hőhatásövezetben), mint a takaró sorokban mértek. Mivel az első gyöksor hegesztése kézzel történt, és annak ellenére, hogy törekedtünk az 5 s hűlési időhöz kiszámított hegesztési paraméterek betartására, a kismértékben változó hegesztési sebesség miatt előfordulhat, hogy a hőbevitel nagyobb volt, amelynek eredményeként a varrat és a hőhatásövezet kilágyulhatott. Mivel a  $t_{8/5}$  hűlési idő a számítások szerint minden esetben 5 s körüli érték volt, ezáltal a fajlagos hőbevitel is hasonlóak voltak, az eltérő hozaganyagok okozta különbségeknek a varratfémekben mért keménység értékek különbségeiben kellene megjelenniük. A könnyebb és jobb összehasonlíthatóság érdekében a varratfémek keménység értékeinek átlagát, szórását és szórási együtthatóját a 7. táblázatban foglaltuk össze.

7. táblázat A varratfémek átlaga, szórása és szórási együtthatója

A hozaganyag jele	A keménységmérés helye	Vickers keménység, HV10	Szórás	Szórási együttható
Böhler Union X96	Takaró 1	421	10,41	2,47
	Gyök	361	6,24	1,73
	Takaró 2	420	4,00	0,95
	Átlag	401	N/A	N/A
Böhler alform 1100-L MC	Takaró 1	402	3,79	0,94
	Gyök	369	5,29	1,43
	Takaró 2	397	7,02	1,77
	Átlag	390	N/A	N/A

A 7. táblázat értékei alapján a keménység értékek szórása és a szórási együtthatója elfogadható mértékű, megbízható mérésekre utal. A varratfémekben mért átlagos keménység értékek alapján a két különböző hozaganyag hasonló keménységet eredményezett. Az adatok alapján a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötések keménysége minimálisan magasabb volt, mint a Böhler alform 1100 L-MC alkalmazása esetén.

## 4. Összefoglalás

Az elvégzett vizsgálatok és azok eredményei alapján a következő megállapítások tehetők.

- 1) A vizsgált S1300 nagyszilárdságú acélon a durvaszemcsés, interkritikus és interkritikus durvaszemcsés hőhatásövezeti sávokban fizikai szimulációs vizsgálatok végeztünk huzalektrodás védőgázos ívhegesztés három különböző technológiai változatára vonatkozóan  $t_{8/5} = 5-30$  s tartományban. A keménységvizsgálatok eredményei alapjai a vizsgált acél a hőciklusok hatására kilágyult, a hőhatásövezeti sávok keménysége egyik esetben sem érte el az alapanyag keménységét. Az ütővizsgálatok alapján pedig a hőhatásövezeti sávok jelentős ridegedése volt megfigyelhető. A  $t_{8/5}$  hűlési idő növelésekor az ütőmunka értéke csökkent.
- 2) A fizikai szimulációs vizsgálatok eredményei és a szakirodalmi ajánlások figyelembevételével alapján a választott  $t_{8/5}$  hűlési idő 5 s volt.
- 3) A hegesztési paraméterek meghatározása a választott hűlési idő figyelembevételével történt. A kísérletekhez két különböző szilárdsági kategóriába tartozó „undermatching” hozaganyagot választottunk: Böhler Union X96, és Böhler alform 1100 L-MC.
- 4) Az optikai mikroszkópos képek alapján a hegesztett kötések szövetszerkezetében és a hőhatásövezeti sávok szélességében nem voltak szignifikáns különbségek, az alkalmazott hasonló hűlési idő és fajlagos hőbevitel miatt.
- 5) A keménységvizsgálatok eredményei alapján a két különböző hozaganyaggal létrehozott kötések mért keménységértékek nagyon hasonlóak voltak; a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötések keménysége minimálisan magasabb volt.
- 6) Ahhoz, hogy a vizsgált anyagokon készített hegesztett kötések mechanikai tulajdonságairól átfogóbb képet kapjunk további vizsgálatokra (szakitó-, hajlító-, műszerezett ütővizsgálatokra, valamint törésmechanikai vizsgálatokra) lesz szükség.

## Irodalomjegyzék

- [1] M. Gáspár, Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel, *Metals*, 9, 2019, 1226.
- [2] M. St. Weglowski, M. Zeman, M. Lomozik, Physical Simulation of Weldability of Weldox 1300 Steel, *Material Science Forum*, 76, 2013, pp. 551-555.
- [3] S. Blacha, M. S. Weglowski, S. Dymek, M. Kopyscianksi, Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded joints of high strength S960QL and Weldox 1300 steel grades, *Arch. Metall. Mater.*, 62, 2, 2017, pp. 627-634.
- [4] P. Kah, M. Pirinen, R. Suoranta, J. Martikainen, Welding of Ultra High Strength Steels, *Advanced Materials Research*, 849, 2014, pp. 357-365.
- [5] M. St. Weglowski, M. Zeman, Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14, 2014, pp. 417-424.
- [6] A. Kurc-Lisiecka, J. Piwnik, A. Lisiecki, Laser welding of new grade of advanced high strength steel Strenx 1100 MC, *Arch. Metall. Mater.*, 62, 3, 2017, pp. 1651-1657.
- [7] R. Branco: High-Strength Steels, New trends in production and application, *Mechanical Engineering Theory of Application*, Nova science publisher, New York, 2018, pp. 144-198.
- [8] M. Gáspár, R. Sisodia: Improving the HAZ toughness of Q+T high strength steels by post weld heat treatment, *Materials Science and Engineering*, 426, 2018, 012012.
- [9] M. Amraei, A. Ahola, S. Afkhami, T. Björk, A. Heidarpour, X-L. Zhao: Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels, *Engineering Structures*, 198, 2019, 109460.
- [10] H. Tervo, A. Kajjalainen, T. Pikkarainen, S. Mehtonen, D. Porter: Effect of impurity level and inclusions on the ductility and toughness of an ultra-high-strength steel, *Materials Science Engineering: A*, 697, 2017, pp. 184-193.
- [11] H. Ban, G. Shi: A review of research on high-strength steel structures, *Struct Build*, 171, 8, 2018, pp. 65-641.
- [12] M. Gáspár, A. Balogh: GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steels, *Production Processes and Systems*, 6, 1, 2013, pp. 9-24.
- [13] Zs. Koncsik: Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches, In: K. Szita Tóthné, K. Jármai, K. Voith (Eds.), *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development (ICESSD 2019)*, October 3-4, 2019, Miskolc, Hungary, CRC Press, 2019, pp. 316-324.
- [14] Zs. Koncsik: A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban, *Multidiszciplináris Tudományok*, 9, 4, 2019, pp. 63-71.
- [15] Zs. Koncsik: Szerkezetintegritási kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben, *Multidiszciplináris Tudományok*, 11, 2, 2021, pp. 372-379.
- [16] D. A. Porter: Weldable high-strength steels: challenges and engineering applications, 68 IIW Annual Assembly & International Conference of the International of Welding, 2-3 July 2015, Helsinki, Finland, 2015.
- [17] F. Farrokhi, J. Siltanen, A. Salminen: Fiber laser welding of direct-quenched ultrahigh strength steels: evaluation of hardness tensile strength, and toughness properties at subzero temperatures, *ASME J Manuf. Sci. Eng.*, 137, 6, 2015, 061012.
- [18] M. Amraei, T. Skriko, T. Björk, X-L. Zhai: Plastic strain characteristics of butt-welded ultra-high strength steel (UHSS), *Thin-Walled Structures*, 109, 2016, pp. 227-241.

- [19] H. Tervo, A. Kajjalainen, V. Javaheri, M. Ali, T. Alatarvas, M. Mehtonen, S. Anttila, J. Kömi: Comparison of Impact Toughness in Simulated Coarse-Grained Heat-Affected Zone of Al-Deoxidized and Ti-Deoxidized Offshore Steels, *Metals*, 11, 2021, 1783.
- [20] M. Tümer, F. Pixner, R. Vallant, J. Domitner, N. Enzinger: Mechanical and microstructural properties of S1100 UHSS welds obtained by EBW and MAG welding, *Welding in the World*, 2022
- [21] MSZ EN 10025-1:2005: Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból. 1. rész: Általános műszaki szállítási feltételek.
- [22] MSZ CEN ISO/TR 15608:2021: Hegesztés. A fémek csoportosítási rendszerének irányelvei.
- [23] ISO 15614-1:2017(E): Fémek hegesztési utasítása és hegesztéstechnológiájának minősítése. A hegesztéstechnológia vizsgálata. 1. rész: Acélok iv- és lánghegesztése, valamint nikkell és ötvözetei ivhegesztése.



# A KAVARÓ DÖRZSHEGESZTÉS SZERSZÁMKIALAKÍTÁSÁNAK KÍSÉRLETI ÚTON TÖRTÉNŐ VIZSGÁLATA

## EXPERIMENTAL TESTING OF FRICTION WELDING TOOLS

**Kovács Zsolt Ferenc**

Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar,  
6000 Kecskemét Izsáki út 10.

kovacs.zsolt@gamf.uni-neumann.hu

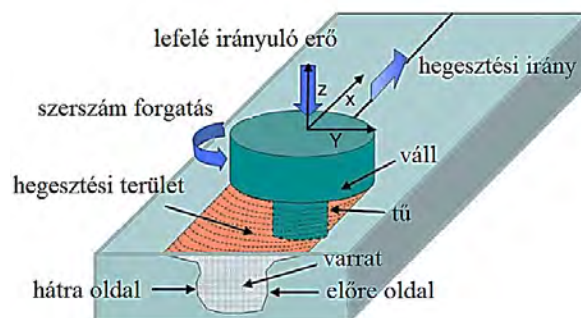
*A repülőgép-, űr- és gépjármű-iparban a kavaró dörzshegesztés (Friction Stir Welding, FSW) kiemelkedő fejlődéssel bíró ágazattá nőtte ki magát. Ahhoz, hogy a FSW eljárás lépést tudjon tartani a rohanó világ tempójával, szükség van hosszú élettartamú, jó minőségű és ezek mellett gazdasági oldalról is optimális FSW szerszámokra. A szerző célja olyan szerszámok megalkotása, amelyekkel a felvázolt kritériumoknak eleget lehet tenni. A konstans paraméter beállítással elvégzett próbahegesztésekkel kapott eredmények kiértékelésével az egyes szerszámok előnyei és hátrányai részletesen ismertetésre kerülnek.*

*In the aerospace, space and automotive industries, Friction Stir Welding-FSW has grown into an emerging industry. In order for the FSW process to keep pace with the rushing world, long life, high-quality and economically optimal FSW tools are needed. The aim of the author is to create tools that can meet the outlined criteria. By evaluating the results obtained by testing the constant parameter, the advantages and disadvantages of each tool are described in detail.*

## 1. Bevezetés

### 1.1 Kavará dörzshegesztés

A kavará dörzshegesztés egy olyan eljárás, amely során egy dörzshegesztő célszerszám segítségével egyesíteni tudunk két éleiknél összeillesztett munkadarabot. A folyamat során, a két lefogott munkadarab közötti résen vezetjük keresztül a szerszámot, ami felmelegíti, ezáltal meglágyítja a munkadarabjainkat és lineáris mozgással előre haladva, a keletkező olvadék kavaráásával és zömítésével egyesíti őket. Fontos alapfeltétel, hogy a megmunkáló szerszám anyagának keményebbnek kell lennie az egyesítendő alkatrészekénél, ellenkező esetben a szerszám megsérülhet, illetve a hegesztett kötés deformálódhat. A kavará dörzshegesztési eljárás elvi vázlatát a 1. ábra mutatja be [1] [2].



1. ábra

A kavará dörzshegesztés elvi ábrája [3]

Ez a technológia a feltalálása óta folyamatos fejlődésnek indult, így számos forradalmi újítást tartalmaz. Felhasználási területe mára rengeteg mindent lefed, szinte bármely iparágban megtalálható alkalmazása.

## 1.2 Kavaró dörzshegesztés szerszámai

Az eljáráshoz használt szerszámok nagy behatással bírnak a megfelelő varratminőség elérésében. Mivel ezek a célszerszámok felelősek az optimális hő létrehozásáért, így a meglágyuló alapanyag egységes elkeveredéséért. Az ilyen hegesztéshez használt szerszámok készülhetnek gyorsacéلبól vagy valamilyen keményfémből is. A szerszámalapanyag választás fő szempontja mindig az, hogy a szerszám keményebb anyagból készüljön, mint a megmunkálni kívánt munkadarab. A szerszámok készülhetnek egy anyagból, de találunk olyan helyzeteket, ahol a váll és a tű különböző anyagból készül. Az utóbbi kivétel gazdaságosabb, hiszen a tű cseréjével meghosszabbítható a szerszámkészülék élettartama [4].

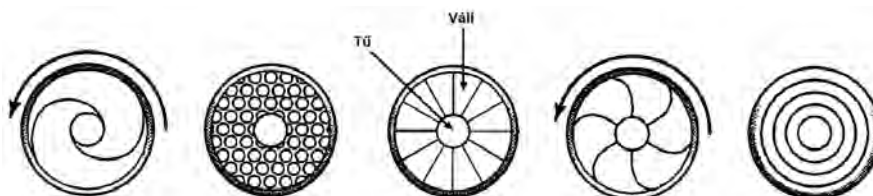
A kavaró dörzshegesztés szerszámának tervezésekor elsődleges szempont a megfelelő anyagválasztás, mely több tényezőtől függ [5]:

- Megmunkálhatóság, az alapanyag keménysége
- Szerszámkészülékre ható igénybevételek
- A szerszámkészülék anyagának lehetséges kiképzése
- Hőtágulási tényező
- Kopás mértékét befolyásoló tényezők.
- Reakcióképesség

A szerszámok tervezése során az előző pontban felsorolt követelmények betartásával kell a tervezést végezzük, amikor is a szerszám két legfontosabb részét a szerszám vállát és a tűt tervezzük. A váll és a tű kialakítása nagyon fontos szerepet tölt be a varrat készítésénél. A tű biztosítja azt a hőhatást, amittől az anyag meglágyul, így keverhető állapotú lesz, a váll pedig a meglágyult anyag hegesztési tartományból való kilépésének megakadályozásán kívül a varrat felszínének minőségéért felel, továbbá a súrlódás végett segít fenntartani az alakításhoz szükséges hőt [3] [6].

## 1.3 Szerszámváll típusok bemutatása

A szerszámváll kidolgozására igen nagy hangsúlyt kell fektetni, mivel a hegesztés során a legnagyobb súrlódás a váll és a megmunkálandó anyag között lép fel. Ennek következtében a hegesztés során termelődő hő nagy része itt alakul ki, így fontos a megfelelő alapanyag kiválasztása. A szerszámváll feladata az anyagáramlás segítése, továbbá az áramló meglágyult anyag visszanyomása a kavaró folyamatba, ezért a váll érintkező felületének kialakítása pontos tervezést igényel. A váll átmérője, a hegesztési varrat szélességét is befolyásolja. Az ideális átmérő függ a hegeszteni kívánt anyag típusától és vastagságától, illetve a hegesztési paramétereiktől. Azonban a paraméterek minimális és maximális értékei nagymértékben függhetnek a szerszámváll homloklapfelületének geometriájától. A szakirodalmi kutatás arra az eredményre vezetett, hogy a különböző kialakítások eltérő nyomóerő hatására képesek elérni ugyan azt a hőmérséklet maximumot, amit sima egy felületű megoldás produkál. Olyan geometria által, ahol a váll munkadarabbal érintkező felülete bevágásokkal van ellátva, nagyobb hőfejlődést érhetünk el, kevesebb nyomóerő kifejtésével, ezáltal bizonyos vállkialakítások révén a jobb anyagáramlás elérése mellett, az erőbevitelt, így a bevitt energiákat is csökkentjük. Ezt a jelenséget azért tudjuk előidézni, mert az eltérő felületek kivágott részeibe folyamatosan beáramló anyagot nyírás által készítjük nagyobb súrlódás útján plusz hőfejlődésre. Így tudunk erősebb kavaróhatást produkálni ugyanolyan vagy kisebb erőbevitellel. A 2. ábrán látható néhány gyakran használt szerszámváll felület [3] [7].

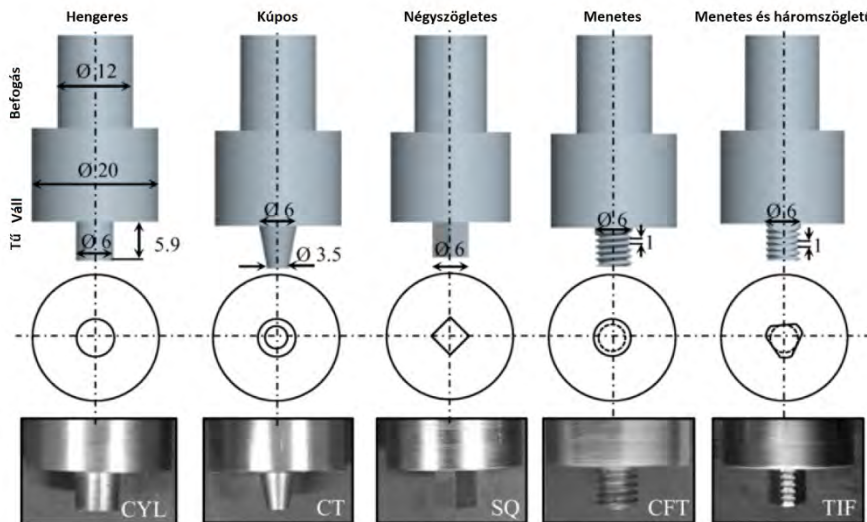


2. ábra

A kavaró dörzshegesztő szerszám vállának lehetséges kialakításai [3]

## 1.4 Szerszámtű kialakítások bemutatása

A túgeometriák kiemelkedő szerepet játszanak a hegesztési kötés minőségének kialakításában. Ezek a geometriák nagyban meghatározzák a meglágyult anyag áramlásának minőségét. Annak érdekében, hogy a legoptimálisabb kötés jöhessen létre különböző bonyolultságú és kialakítású eszközök közül tudunk választani annak függvényében, hogy milyen a munkadarabunk alapanyaga. A szilárdságtani jellemzőt leginkább a szemcsefinomítás révén tudjuk optimalizálni. Tehát a szemcsefinomítást kell a lehető legjobban elvégeznünk. Mivel a hegesztés során rontjuk az anyagok szívósságát és ezt a veszteséget kell minimalizálnunk. Természetesen minél kidogozottabb egy szerszám annál költségesebb is, hiszen több technológiával kell adott esetben megmunkálni. A legegyszerűbb szerszámkialakítás a hengeres és a négyszögletes. A kiskereskedelemben is könnyen hozzáférhető, amennyiben gyorsacélról (HSS) beszélünk. Az általánosan ismert és használt szerszámtűkről a 3. ábra nyújt informatív illusztrációt [8].



3. ábra

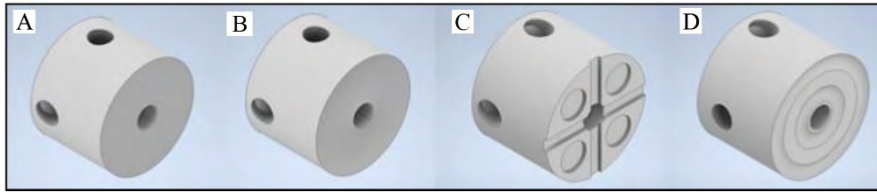
A kavaró dörzshegesztő szerszám tűjének lehetséges kialakításai [9]

## 2. Kavaró dörzshegesztő szerszám tervezésének menete

A dörzshegesztés során használatos készülék három fő elemből áll, melyek a befogószerszám, váll és a tű. Ezen elemek közül a legnagyobb hangsúlyt a váll és befogó szerszámra kellett fordítani, mivel ezen alkotórészek hatékonyabbá tételével jelentős költségcsökkentést érhetek el. Elsődleges cél, hogy egy működő, 3 egységből (szerszám test, váll és tű) álló hegesztéshez alkalmas szerszám kerüljön létrehozásra, amelyben könnyen cserélhetőek a különböző komponensek, így a kopás okozta folytonos és felesleges szerszámcsere megelőzhető. Sok esetben a tű és a váll egy anyagból van kimunkálva, mivel a két feladatot ellátó szerszám nem egyenlő mértékben kopik, a tű felhasználásával adott esetben egy még tökéletesen használható vállrész is leselejtezésre kerül. Így tehát nincs kihasználva egy szerszámban lévő potenciál az üzemórát tekintve, ami gazdasági szempontból jelentős hátrányt jelent.

### 2.1 Váll tervezése

A szakirodalmi áttekintés rávilágított arra a fontos tényre, hogy minél több a dolgozó élek száma a vállon, annál hatékonyabbak lehetünk a hegesztés során. Azonban ezt nem lehet a végletekig kisarkítani, ugyanis a túlságosan bonyolult homlokfelületek jelentősen növelnék a gyártási költségeket. Jelen esetben, a tervezett vállak homlokfelületének területe mindössze 301,6 mm<sup>2</sup>. Ebből a területből kell a megfelelő mennyiséget kimunkálni és a legjobb hegesztési kötést elérni oly módon, hogy közben a gyártás továbbra is gazdaságos maradjon. A 4. ábrán láthatóak azok a geometriák, melyek a kísérletekhez legyártásra kerültek. A látható négy illusztráció közül az A jelzésű már létező és használatos vállkialakítás, ugyanis az iparban leginkább sima homlokfelületű vállakat alkalmaznak, azonban fontos a referenciaeredmények előállításához.

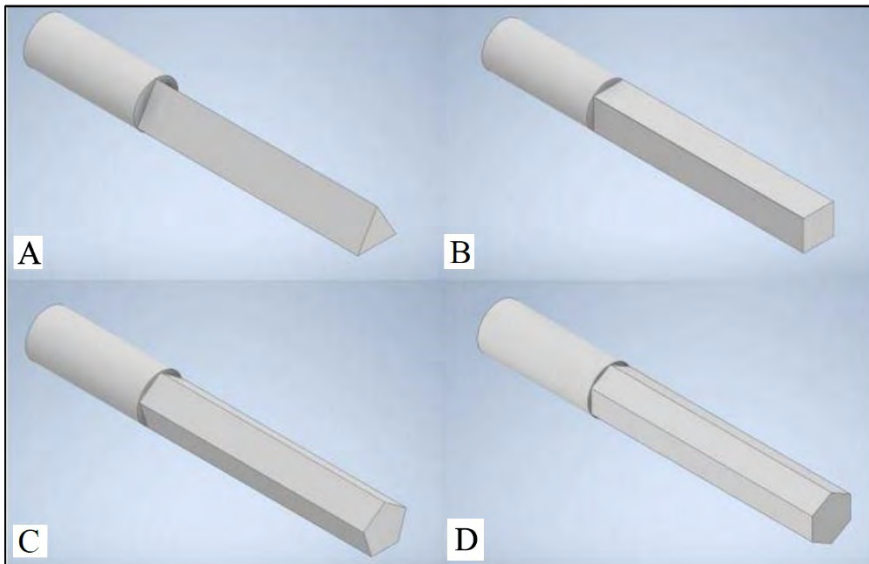


4. ábra

Vállkialakítások illusztrációi (A-sík felületű, B-rádiuszos, C-mart felületű, D-dupla rádiusszal ellátott)

## 2.2 Tű tervezése

A tű kialakítása nagy szerepet játszik az olvadt alapanyag megfelelő kavarásában. A tervezés során előtrében kell részesíteni azon formával rendelkező kialakításokat, amelyek valamilyen sokszög alakzatot vesznek fel. Ennek oka, hogy pulzáló hatást keltenek, ami előnyös lesz a hegesztési varrat kialakításánál. Azonban, a költségek minimalizálása érdekében nem érdemes az 4. ábrán láthatónál bonyolultabb tűgeometriák megalkotása, mivel ezek a sokszögalakzatok megfelelő tulajdonsággal bírnak, egy bonyolultabb kialakítás csak a költségeket növelné. A gyártásra került tűk sokszögmintái a 3-4-5 és 6 szög alakúak.



5. ábra

Tűkialakítások illusztrációi (A-háromszög, B-négyszög, C-ötszög, D-hatszög)

## 3. Próbahegesztések

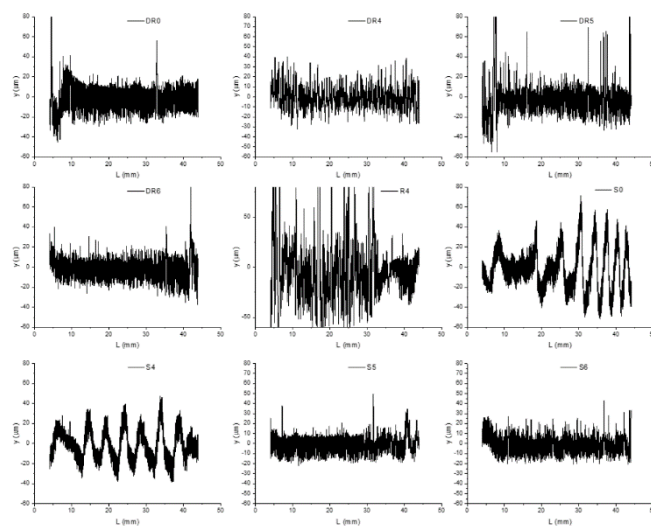
A kísérletekhez Al6060 (AlMgSi) anyagminőség került kiválasztásra, mert tulajdonságát tekintve könnyen alakítható, jó korrózió állósággal rendelkezik, továbbá felülete jól festhető és lakkozható, valamint ipari alkalmazásban rendkívül elterjedt. A hegesztésnél alkalmazott technológiai paraméterek 1000 ford/min főorsó fordulatszám, 115 mm/min előtolási sebesség és 1,5°-os szerszám bedöntés mellett végig konstansok voltak. A kísérletek során csak a tű és a váll geometriája változott, így összesen 16 kísérletből állt a próbahegesztés. Viszont a kísérlet elején bebizonyosodott, hogy a 4. ábrán B-vel jelölt rádiuszos váll sorozatosan törte a tűket és az anyagot is begyűrte (6. ábra), ezért azt a vállgeometriát elhagyva végül 12 kísérlet került végrehajtásra.



5. ábra

Rádiuszos váll a sikertelen kísérlet után

A hegesztési kísérletek után 20 mm széles 90 mm hosszú mintadarabok kerültek kimunkálásra a hegesztett próbadarabokból. Mivel a hegesztett varratok minősítésénél a varrat koronaoldalának felszíne is fontos szerepet tölt be, így először a felületek érdessége került megmérésre. Az érdességmérő gép három próbatest estében nem tudott megfelelő értékekkel szolgálni, ugyanis ezeknek a daraboknak az érdessége meghaladta a berendezés mérési tartományának maximális értékét. A mérés során felvett érdességprofilokat a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra

Gyökoldalak érdességprofiljai

Az érdességmérés eredményei alapján a dupla rádiusz és a sima vállal készült varratok koronaoldalai a legsimábbak. Érdességmérés után a metallográfiai vizsgálatok következtek. A mintadarabok vizsgálata során számos zárvány- és alagúthibát lehetett látni (7. ábra).



7. ábra

Alagúthiba (C-mart felületű váll és D-hatszög tű)

Továbbá a varratkeresztmetszetet vizsgálva egyes daraboknál teraszos repedés volt látható, amely nagyon gyenge kötésre utal. Ezen hibák többnyire a hatszög tű és dupla rádiusszal ellátott váll esetében alakultak ki (8. ábra).



8. ábra

Teraszos repedés (D-dupla rádiusz váll és D-hatszög tű)

A sima homloklapfelületű váll és a négyszög geometriás tű kombinációjával a kísérletek legjobb kötése jött létre, nem látni zárványt vagy bármilyen olyan hibát, amely negatív hatással lenne a varrat tulajdonságára. Ez az eredmény arra enged következtetést, hogy a négyszög kialakítású tű biztosítja a legjobb kavardást az anyagban, valamint a sima felületű vállal érhető el a legjobb felületi minőség.

## 4. Összefoglalás

A kísérlet sikerességét bizonyítja, hogy egyedi tervezésű szerszámbe fogóval, váll és tű segítségével sikerült megfelelő minőségű kötéseket létrehozni. Az érdességmérési vizsgálatok és a metallográfiai eredmények egyhangúan mutatták, hogy az iparban jelenleg is gyakran használatos sima homloklapfelülettel rendelkező váll a leghatékonyabb, amennyiben általános felhasználásról beszélünk. Ez a váll gyártási költség szempontjából a legkedvezőbb a vizsgált kialakítások közül. Az ehhez a vállhoz társított négyszög geometriájú tű, szintén olcsón beszerezhető, így gazdasági tényezőknél ez is minden tekintetben megfelel.

A többi váll és tű kialakítás megvizsgálása ipari szempontból is fontosnak mondható, mivel különleges esetekben, létjogosultsága lehet az előbb említett kialakítástól eltérő szerszámokra is, ugyanis anyagminőségek esetében csak bonyolultabb szerszámgeometria lehet képes a megfelelő hőmennyiség létrehozására és a kívánt kavarási hatás elérésére.

## Irodalomjegyzék

- [1] M Milčić, T Vuherer, I Radisavljević, D Milčić, J Kramberger and B Andjelković: Mechanical behaviour of Al 2024 alloy welded by friction stir welding, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* vol. 393 (2018) 012107
- [2] N. Dialami, M. Chiumenti, M. Cervera & C. Agelet de Saracibar: Challenges in Thermo-mechanical Analysis of Friction Stir Welding Processes, *Arch Computat Methods Eng* vol. 24, (2017) pp. 189–225
- [3] R.S. Mishra, Z.Y. Ma: Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R 50* (2005) pp. 1–78
- [4] D. Venkateswarlu, N. R. Mandal, M. M. Mahapatra, S. P. Harsh: Tool Design Effects for FSW of AA7039, *Welding Journal* vol. 92 (2013) pp. 41s-47s
- [5] G. Padmanaban, V. Balasubramanian: Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach, *Materials & Design* vol. 30, Issue 7 (2009) pp. 2647-2656
- [6] Prof. Bharat Raj Singh: A Hand Book on Friction Stir Welding *Lambert Academic Publishing*, UK (2012)
- [7] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara: Review of tools for friction stir welding and processing, *Canadian Metallurgical Quarterly* vol. 51 (2012) pp. 250-261
- [8] S. M. Bayazida, H. Farhangia, A. Ghahramani: Effect of Pin Profile on Defects of Friction Stir Welded 7075 Aluminum Alloy, *Procedia Materials Science* vol. 11 (2015) pp. 12-16
- [9] P Biswas, D A Kumar and N R Mandal: Friction Stir Welding of Aluminum alloy with varying Tool Geometry and Process Parameters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* vol. 226 (2011) pp. 641-648

# KÉT- ÉS HÁROMDIMENZIÓS HŐVEZETÉSI FOLYAMATOK KÖZÖTTI ÁTMENET EGY LEHETSÉGES KÖZELÍTÉSE

## A POSSIBLE APPROXIMATION OF THE TRANSITION BETWEEN TWO- AND THREE-DIMENSIONAL HEAT CONDUCTION PROCESSES

**Kozsely Gábor**

Miskolci Egyetem,

Elektrotechnikai és Elektronikai  
Intézeti Tanszék

gabor.kozsely@uni-miskolc.hu

**Palotás Béla**

Dunaujvárosi Egyetem

Műszaki Intézet

Gépészeti és Anyagtudományi Tanszék

palotas.bela@uniduna.hu

*A hegesztés szakirodalma az előző ezred végén kezdett foglalkozni olyan hővezetési problémák megoldásával, ami középvastag lemezek hegesztésével foglalkozik. Az úgynevezett 2,5D modellt célja, hogy egyesítse a háromdimenziós nagytest modellt, a vékonylemez 2D modelljének vastagság függésével. A cikkben bemutatunk és elemezzünk egy meglévő 2,5D modellt, illetve ismertetünk egy általunk kidolgozott modellt.*

*The welding literature started to address thermal conductivity problems in the welding of medium thickness plates at the end of the last millennium. The so-called 2.5D model aims to combine a three-dimensional large-body model with a two-dimensional model of the thickness dependence of the thin plate. In this paper, it has been presented and analyzed an existing 2.5D model and is described a new model.*

### 1. Bevezetés

Az ipari gyakorlatban a hegesztést több, mint 100 éve használják. Ez a hegesztéssel létrehozott kötési mód jelentős előnyeivel magyarázható.

A hegesztés során a hőmérséklettartomány igen jelentős mértékben – a kezdeti környezeti hőmérséklettől a likvidusz hőmérsékletig, illetve azt meghaladóan is – változhat, a hevítési és hűtési sebesség másodpercenként akár több száz fok is lehet. Emellett még kémiai reakciók is végbe mehetnek a hegfürdőben.

A hegesztési technológia optimalizálása érdekében ismerni kell, hogy a hegesztési feltételei (nemesfém és hozaganyag, hegesztési módszer és paraméterei) hogyan befolyásolják ezeket a folyamatokat.

### 2. A hegesztés hőtani modellezése

A hegesztési folyamatot is valamilyen fizikai és az ebből származtatott matematikai modell megalkotásával tanulmányozhatók elméleti úton. A modell soha nem képes a valóságot teljes bonyolultságában leírni. A modellezés során gyakran körül kell határolni a valós folyamatnak, mint rendszernek azt a részét, amellyel az adott feladat megoldása szempontjából számunkra fontos, azaz a folyamatnak mindig csak egy részét, vagy bizonyos aspektusait ragadjuk ki, amely a megoldáshoz elengedhetetlen. Bizonyos esetekben nagyon le kell egyszerűsíteni a valóságot.

A modell tehát mindig célorientált. Bonyolultságát a megoldandó feladat jellege, a műszaki feltételek, az észszerűség és gyakran az anyagi lehetőségek korlátozhatják. A modellalkotásnál az a legnagyobb kihívás, hogy megtaláljuk a modellben tett elhanyagolások, illetve egyszerűsítő feltételezések és a számítási pontosság közötti egyensúlyt.

A geometriával és a hőbevitellel kapcsolatos egyszerűsítések az analitikus modellben feltétlenül szükségesek a megoldásokhoz. A végesesemes megoldások viszont elvileg szinte bármilyen bonyolultságot engednek figyelembe venni, bár ennek a módszernek is vannak korlátjai.

Minden modell közös jellemzője, hogy figyelmen kívül hagyják a hegfürdő bonyolult folyamatait. Ez különös igaz az olvadási és megszilárdulási folyamatokra, olvadék mozgásra, valamint hőátadással áramlás (konvekció) és sugárzás módjára

vonatkozóan. A modellalkotásnál csak megjelenő olvadáskor, illetve megszilárduláskor fellépő látens hőt veszik figyelembe alkalmanként. A legtöbbször a hegfűrdő bonyolult termikus folyamatát egyszerűen, mint a hővezetés kontinuum hőforrásaként közelítik meg. ([1] p. 30)

Általában a modellalkotáskor, a legelső közelítésben három alapeometriát, a félig végtelen testet (3D), lemezt (2D) és a rudat (1D) szoktak használni.

A hővezetés félig végtelen méretű dimenzió használata a véges dimenziók helyett annál inkább helytálló, minél nagyobb test (munkadarab) mérete az adott irányban. Továbbá minél rövidebb a vizsgált időtartam, ha a hődiffúziós együtthatója kicsi (inkább a hőtárolás dominál), illetve, ha a minél közelebb van vizsgált terület a hőforráshoz, még akkor is ez a közelítés, ha az anyag hődiffúziós együtthatója ( $a$ ) nagy.

Az egy- illetve kétdimenziós hővezetés modell annál jobban közelíti a valóságot, minél kisebb a rúd keresztmetszete, illetve a lemez vastagsága. Továbbá jó hővezető anyagoknál koncentráltabb hőforrásnál, hosszabb a vizsgálati időtartamnál is pontosabb eredményt ad a modell. Hőtároló anyagok akkor is használható, ha a vizsgált terület távolabb is van a hőforrástól. A hővezetés differenciálegyenlete egyszerűbb alakban írható fel, ha bevezetjük a hőmérsékletvezetési szám, vagy másnéven hődiffúziós együttható fogalmát a (1) egyenlet szerint, amelyben a  $c$  jelenti a kontinuum hőkapacitását,  $\lambda$  hővezetési tényezőjét, és  $\rho$  a sűrűségét:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (1)$$

Az ívhegesztés hőmérsékletmezőjének számításánál a hőbevezetés három, klasszikus modellt használnak a szakirodalomban: ([2] p.40.)

- Pontszerű hőforrás hatása félig végtelen méretű testre, ezt vastag lemez modellnek vagy háromdimenziós hővezetésnek is nevezik.
- Pontszerű hőforrás hat a véges vastagságú lemez felületén.
- Lineáris hőforrás hat vékony lemezben.

## 2.1. Vastaglemez modell (3D)

A hegesztést legtöbbször mozgó hőforrással valósítjuk meg. A folyamatosan ható és mozgó hőforrás körüli hőmérsékleti mező matematikai kifejezése a szuperpozíciós elv alapján történik. Ez az elv csak egy lineáris differenciálegyenlet esetében érvényes, amely azon a feltételezésen alapul, hogy az anyagjellemzők értékei függetlenek a hőmérséklettől. Ez a linearizálás sok esetben elfogadható feltételezés. A problémát ebben az esetben pillanatnyi források sorozataként kezeljük. Következésképpen mozgó forrás esetén a távolságok is fel van osztva; más szavakkal, a pillanatnyi források egymás után vannak elrendezve a mozgás irányában. A hővezető szilárd anyag egyes pontjaiban lévő differenciális, pillanatnyi források hatását összeadni kell, figyelembe véve a pillanatnyi források előfordulásának idejét és helyét, azaz matematikai szempontból integrálni kell.

A megoldást, azaz  $x$ -tengely irányban  $v$  konstans sebességgel mozgó félig végtelen kiterjedésű testben kialakuló hőmérsékletmezőt, amelyet a koordinátarendszer kezdőpontjában elhelyezett pontszerű és időben folyamatosan működő hőforrás hoz létre, amely  $\Phi(t)=\Phi_0$ , azaz időben állandó időegység alatti hőbevitel esetére (2) egyenlet adja meg, azaz  $t$  időpillanatban a pontforrástól  $R$  távolságban lévő pontokban,  $x$ ,  $y$ , és  $z$  koordinátákkal rendelkező pontnak mekkora a  $T$  hőmérséklete:

$$T(x; y; z; t) = T_0 + \frac{\Phi_0}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot (x + R)}{2 \cdot a \cdot t}\right) \quad (2)$$

Az fenti egyenletből az alábbi állítások következnek: Ha a sebesség állandó, akkor a hőmérséklet-növekedése egyenesen arányos a hőbevitellel. Ha hőbevitel állandó, akkor hőforrás előtti hőmérsékleti gradiens ( $x > 0$ ) növekszik a  $v$  sebesség növekedésével, de a hőforrás mögötti hőmérséklet ( $x < 0$ ) nem változik

Nagyon nagy sebességek esetén a hő szinte kizárólag keresztirányú (nagy teljesítménnyel, nagy sebességgel dolgozó hőforrások). Ebben az esetben az  $x$  irányú elvezetést el szokás hanyagolni. Így a (2) egyenlet a következőképpen módosul, (3) egyenlet ([3] p.75. [4] p.129 [5] p.785-789. [14] p.171. [6] p.41.):

$$T(x; y; z; t) = T_0 + \frac{\Phi_0}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot R}{2 \cdot a \cdot t}\right) \quad (3)$$



## 2.2. Vékonylemez modell (2D)

Vékony lemezekben végbemenő folyamatok vizsgálata során egyrészt el lehet tekinteni a lemez két oldala közötti hőmérsékletkülönbségtől. Másrészt a lemez két oldalán a környezetnek leadott hőtől, ami ebben az esetben is hővesztéséget jelent. A vékony lemez esetén a hővezetés kétdimenziós, és a peremfeltétel csak a lemez széleire vonatkozóan tartalmazhatnak előírásokat, és a lemez felületén létrejövő hőcsereviszonyok nem foglalhatók bele. Ezért a hővesztéséget, mint negatív hőforrást a differenciálegyenletben kell számításba venni. az  $s$  vastagságú lemez térfogategységre vonatkoztatott hővesztéségeként számíthatjuk ki ([1] p.38.) [3] p.67. [4] p.178. [5] p.769. [7] p.98.

A hővezetési folyamatot leíró differenciálegyenlet egyszerűen származtatható, A probléma kétdimenziós, ezért  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$  és a test nyugalomban van így ( $\mathbf{v}=\mathbf{0}$ ). A kezdeti és peremfeltételek a 3D modellhez hasonlóan lehet felírni. A megoldást pedig a (4) egyenlet adja meg:

$$T(x; y; z; t) = T_0 + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot I_{2D}(x; y; z; t) \quad (4)$$

Ahol  $I_{2D}(x; y; z; t)$ -vel jelölt függvényt az alábbi improprius integrállal lehet kiszámolni. Ebben az esetben is igaz, időben állandó időegység alatti hőbevitel esetén is nagyon bonyolult összefüggést ad. A  $t \rightarrow \infty$  időpontban a folyamat kvázistacionáriássá válik, és ekkor a végtelen testben kialakuló kétdimenziós hőmérsékleteloszlást, – amit a hegesztési szakirodalomban lineáris hőforrásnak neveznek – a (10) egyenlet adja meg ([1] p.41. [3] p.75. [4] p.129. [5] p.769. [7] p.169.), (5) egyenlet:

$$T(x; r) = T_0 + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_0\left(r \cdot \sqrt{\left(\frac{v}{2 \cdot a}\right)^2 + \frac{b}{a}}\right) \quad (5)$$

## 2.3. Nagyteljesítményű, nagy sebességgel mozgó hőforrások

A gyorsan mozgó nagy teljesítményű forrásokat –mint azt a neve is mutatja – a nagy hőteljesítmény ( $q$ ) és nagy hőforrás sebesség ( $v$ ) jellemzi, de ezeket a – hegesztés szempontjából legfontosabb – paramétereket olyan módon növeljük, hogy  $\frac{q}{v}$  hányados állandó maradjon. ([1] p.111.), [3] p.85. [2] p.46. (6) egyenlet:

$$\lim_{\substack{q \rightarrow \infty \\ v \rightarrow \infty}} \frac{q}{v} = \text{állandó} < \infty \quad (6)$$

Az a hiba, amelyet ezzel a közelítéssel elkövetünk a hőforráshoz közel lévő pontokban viszonylag kicsi. Ezért az egyszerűsített képletek ezért különösen alkalmasak a hegesztéshez közeli területek elemzésére. A növekvő sebesség és az arányosan megnövelt hőteljesítmény növekedésével a nagy hőmérsékletű, túlelegetett rész területe megnő még pedig olyan módon, hogy a hossza (a hegesztési sebesség irányú méret) a sebességgel arányosan növekszik, szélessége (a hegesztésre merőleges méret) pedig egy bizonyos határig. Nagyon nagy sebességnél a hő elsősorban a hőforrás mozgási irányára merőlegesen terjed, a hegesztés irányában történő hőterjedés elhanyagolhatóan kicsi lesz. Ezért a hőterjedés folyamatát leíró számítási sémák jelentősen leegyszerűsödnek.

A következő elméleti megfontolással él a modell. Gyorsan mozgó pontforrás hőmérsékletmezőjének minden izotermáján megkülönböztethető egy szakasz, amelynek körvonala párhuzamos a hegesztési irányval. Ekkor a félig végtelen szilárd anyagot vagy lemezt nagyszámú vékony sík rétegre oszthatjuk fel, amelyek merőlegesek a hőforrás mozgási irányára. A hőforrásnak a megfelelő rétegen való áthaladásakor bevezetett hő ezután kizárólag ebben a rétegben diffundál, függetlenül a szomszédos rétegek állapotától. Ilyen módon a hegesztési izotermák által határolt térrész úgy kezelhető, mintha véges vastagságú szigetelt test lenne. A hőmennyiség kiszámítására a következő megfontolásokat kell tenni. A végtelenül kicsiny  $dt$  idő, amely alatt a gyorsan mozgó forrás felmelegíti a szóban forgó síkréteget, megegyezik a hőmennyiséggel, hővezetéssel ez melegíti fel az adott térrészt. Továbbá, az  $x$  irányú hővezetés elhanyagolása miatt, és a varrat egy közeli pont koordinátáit  $y_0$ -nal és  $z_0$ -lal jelölve az  $R$  a Pitagorasztételből számolható. Ezek alapján a határhőmérsékletet leíró összefüggést a (7) egyenlet adja; ([1] p.49. [3] p.85. [2] p.46.):

$$T(y_0; z_0; t) = T_0 + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot t} \cdot \frac{q}{v} \cdot \exp\left(-\frac{y_0^2 + z_0^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad (7)$$

A vékony lemezek lineáris forrással történő hevítésekor, a hőterjedés folyamat számítására alkalmas összefüggés levezetését egy hasonló logikai gondolatmenettel lehet megoldani. Az  $s$  vastagságú lemezt a hegesztési varratra merőlegesen

gondolatban vékony szeletekre osztjuk, ahol a szeletek közötti hőáram megengedett. Az így megalkotott modellre vonatkozó hőmérsékleteloszlást a (8) egyenlet adja:

$$T(y_0; t) = T_0 + \frac{q}{v \cdot \sqrt{4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{y_0^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t\right) \quad (8)$$

### 3. A lehülési folyamat hőtani paraméterei

A hegesztés hőciklusa alatt a hegesztett kötés (varrat vagy hőhatásövezet) kiválasztott pontjának hőmérsékletváltozását (növekedését, illetve csökkenését) jelenti. Ez alapvető fogalom a hegesztési paramétereknek, a kötés létrehozásakor végbemenő szövetszerkezeti változásokra kifejtett hatásának értékelésénél.

#### 3.1. Lehülési sebesség meghatározása

A hűtési sebességet a különböző modellek hőmérsékletfüggvényéből számoljuk, annak idő szerint elsőrendű differenciálhányadosát véve a pillanatnyi hőmérsékleteknél. Az egyenletek egyszerűsítése érdekében csak a hegesztési középvonal pontjait vesszük figyelembe, és a modell hernyóvarratra vonatkozik.

A nagyméretű tárgy esetén hőmérséklet idő függését legegyszerűbb (7) egyenlet alapján meghatározni. A varrat középvonalán esetében az  $y_0=z_0=0$  értékét vesz fel, azaz exponenciális tag értéke 1 lesz. Így a keresett hőmérséklet függvényt a (9) egyenlet adja, majd határozzuk meg az idő szerinti első derivált általános alakját. Ezekből pedig a lehülési sebességet, mint a hőmérséklet függvénye meredekség, (10) egyenlet: ([1] p.111-112 [2] p.52. [3] p.233-236. [8] p.42):

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{t} \quad (9)$$

$$\varpi = -2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T(t) - T_0)^2}{\frac{q}{v}} \quad (10)$$

Hasonlóképpen vékony lemezeknél (2D) ugyanezen megfontolás alapján a hűlési sebességet levezetni a (8) egyenletből. A hőmérséklet idő függését a varrat közepén; (11) egyenlet, a lehülési sebességet pedig a (12) egyenlet adja meg.

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

$$\varpi(T) = -2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{(T(t) - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v}\right)^2} \cdot s^2 \quad (12)$$

A (13) és (15) egyenletekből következik; hogy az adott hőmérséklethez (T) tartozó pillanatnyi hűlési sebesség a hosszegységre jutó energiától, a tárgy alakjától és méretétől, valamint az előmelegítés hőmérsékletétől ( $T_0$ ) függ. A hűlési sebesség nő, ha a hőmérsékletkülönbség nő. Az előmelegítés hőmérséklete nagyobb mértékben változtatja a lehülési sebességet vékony lemezeknél (2D), mivel itt a hőmérsékletkülönbség a harmadik hatványon szerepel, - nagyméretű tárgynál pedig csak a másodikon. Hasonló megállapítás tehető a hosszegységre eső energiára vonatkozóan is. A pillanatnyi hűtési sebesség egy adott hőmérsékleten nem függ az időegység alatt bevitt hőenergia (q) és a sebesség (v) abszolút értékeitől, hanem csak arányuktól ( $\frac{q}{v}$ ). Minél nagyobb az effektív hőbevitel ( $\frac{q}{v}$ ) annál kisebb a lehülési sebesség ( $\varpi$ ). A hőbevitel változásának hatása vékony lemezeknél erősebb, mint a nagyobb tárgyak esetében, mivel utóbbi fordítottan arányos a szakaszenergia első hatványával, amíg a vékony lemezeknél a második hatványtól függ.

### 3.2. A lehülési idő számítása félig végtelen testben (3D) és vékony lemezben (2D)

Hegesztési folyamatoknál nagyon gyakran az adott hőmérsékletek közötti lehülési idő ismerete elengedhetetlen, mert az acél hegesztésénél a varratban és a hőhatásövezetben a kialakult szövetszerkezetre és az ebből következő mechanikai tulajdonságokra a lehülési idő nagyságrendjéből következtetünk. A gyakorlatban  $T_1=850\text{ °C}$  illetve  $800\text{ °C}$  ( $1123\text{K}$  illetve  $1073\text{K}$ ) a kezdeti hőmérséklet és  $T_2=500\text{ °C}$  befejező hőmérséklet közötti hőmérséklettartományra számolják ki és  $\Delta t_{8/5}$  szimbólummal jelölik.

A  $T_1$  és  $T_2$  a hőmérséklettartományban lehüléshez szükséges idő a sebesség reciprokának integrálásával fejezhető ki; (13) egyenlet:

$$\Delta t_{T_1/T_2} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{\varpi(T)} dT \quad (13)$$

A (10) és (12) egyenletekkel felírt  $\varpi(T)$  lehülési sebességet hőmérséklet függését előzőekben megadott értékeit behelyettesítve és az integrálást elvégezve az alábbi eredmények adódnak:

A hűlési idő értéke nagy méretű testekre (3D) (14) egyenlet vonatkozik:

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(3D)} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{q}{v} \cdot \left( \frac{1}{T_2 - T_0} - \frac{1}{T_1 - T_0} \right) \quad (14)$$

Hasonlóképpen kiszámolható vékony lemezekre (2D) is a lehülési idő; (15) egyenlet:

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(2D)} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \left( \frac{q}{v} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{(T_2 - T_0)^2} - \frac{1}{(T_1 - T_0)^2} \right) \quad (15)$$

A (14) és (15) egyenletek valójában a hegesztési középvonal hűtési idejére vonatkoznak, mert egy félig végtelen (3D) és véges kiterjedésű (2D) gyorsan mozgó pontforrásra vonatkozó hevítési modellekből lett levezetve, amelyben varratirányú (x-tengely) hővezetést elhanyagoltuk és kétdimenziósnál hőszigetelést is alkalmaztunk.

([1] p.111-112. [2] p.52. [3] p.233-236. [7] p.357. [8] p.39):

A fenti, elméleti megközelítésekkel levezetett összefüggések a gyakorlatban nagyon elterjedtek és előszeretettel használják ezeket, olyannyira, hogy kisebb módosításokkal még szabványosították is az MSZ EN 1011-2:2001: Hegesztés. Ajánlások fémek hegesztéséhez. 2. rész: Ferrites acélok ívhegesztése címmel. Ebben a szabványban a (14) és (15) egyenleteket úgy módosították, hogy a hegesztési eljárásokhoz, valamint varratalakhoz szorzó faktorok lettek hozzá rendelve, ezáltal veszik számításba a lehülési idő csökkenését, illetve növekedését a különböző esetekre vonatkozóan.

### 3.3 A 2D és 3D közötti határvastagság meghatározása

Azt a vastagsági határt, amelytől a hűlési sebesség független a vastagságtól a (14) és (15) egyenlettel megadott lehülési időket egyenlővé téve lehet azt a vastagságot meghatározni, (16) egyenlet:

$$t_{T_1/T_2}^{(3D)} = t_{T_1/T_2}^{(2D)} = t_{T_1/T_2}^{(2D|3D)} \quad (16)$$

A nagyméretű tárgy (3D) és vékonylemez (2D) közötti határvastagságot a (17) egyenlet írja le:

$$s_{2D|3D} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v} \cdot \left( \frac{1}{T_2 - T_0} + \frac{1}{T_1 - T_0} \right)} \quad (17)$$

A (17) egyenlet alapján meghatározott határvastagsághoz tartozó fajlagos hőbevitelt (18) egyenlet adja meg:

$$t_{T_1/T_2}^{(2D|3D)} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2 - 2 \cdot T_0} \cdot s_{2D|3D}^2 = k_{2D|3D} \cdot s_{2D|3D}^2 \quad (18)$$

$=k_{2D|3D}$

Az egyenlet alapján jól látható, hogy a lehülési idő  $t_{T_1/T_2}^{(2D|3D)}$  vastagsági határ függvényében parabolikus jellegű.

## 4. A 2,5 dimenziós hővezetési modellek

A 3D és a 2D modellek közötti átmenetre, a középvastag lemezek alkották meg az úgynevezett 2,5D modellt. Ezzel a modellel az volt a cél, hogy egyesítse a háromdimenziós nagytest modellt a vékonylemez 2D modelljének vastagság függésével. Ez utóbbi modellt gyakrabban használják a hegesztési gyakorlatban.

Az alap feltételezés 3D és 2D modell felírásához használt kiinduló (7) és (8) egyenletek korlátozottan használhatók bizonyos mérettartományban.

A legkorábbi szakirodalmak arra megállapításokra jutottak, hogy mind a vékony, mind a vastag lemezre vonatkozó hőmérsékletmezőt leíró egyenletek hasonlóan viselkednek nagy távolságokon vagy hosszú időkből.

Ugyanakkor a hőforráshoz közelebb eső pontokon, vagy kis időértékeken a vékony lemezre vonatkozó egyenletek eredményei nagyon pontatlanok. Továbbá, van egy vastagsági határ, amelynél – főleg a nagyobb fajlagos hővezetelnél – a hőmérsékletváltozás kiszámítása szintén nem ad helyes eredményt, mivel nem illeszthető rá pontosan sem vastag és sem vékonylemez modell.

A szakirodalomban a továbblépést a határvastagság meghatározása adta; (20) egyenletet. Azonban ez a módszer csak a varrat középvonalának környékére ad pontos eredményt.

### 4.2. Kirk-féle modell

Christopher Selby Kirk által felállított 2,5D modellt a következő módon vezeti be. Első lépések átalakítja (5) egyenletet olyan módon, hogy a másodrendű Bessel-függvényt exponenciális egyenlettel közelíti. ([9] p.82.) Vékony lemezre az (19) egyenletet adja a közelítés:

$$T(y; t) = T_0 + \frac{q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{v}} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(v^2 \cdot t^2 + y^2)^{\frac{1}{4}}} \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot c}{2\lambda} \cdot v \cdot (\sqrt{v^2 \cdot t^2 + y^2} - v \cdot t)\right) \quad (19)$$

A vastag lemezre pedig az (20) egyenletet adja a közelítés:

$$T(y; z; t) = T_0 + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{(v^2 \cdot t^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot c}{2\lambda} \cdot v \cdot (\sqrt{v^2 \cdot t^2 + y^2 + z^2} - v \cdot t)\right) \quad (20)$$

A vékony lemez (19) egyenletet úgy módosítva, hogy a vastagság tényezőt egy függvénnyel vette figyelembe és kiterjeszti azt a harmadik dimenzióra is (z-irányra); (21) egyenlet.

$$T(z; t) = T_0 + \frac{q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{v}} \cdot \frac{1}{f(s)} \cdot \frac{1}{(v^2 \cdot t^2 + y^2)^{\frac{1}{4}}} \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot c}{2\lambda} \cdot v \cdot (\sqrt{v^2 \cdot t^2 + y^2 + z^2} - v \cdot t)\right) \quad (21)$$

A vastagság függvényre pedig az (22) egyenlettel adja meg. Ezzel veszi figyelembe, hogy egyenletesen mozgó hőforrás esetén, a közép vastag lemezek átmenetet képezzenek a vékony lemezes modell és vastag lemezes modell között:

$$f(s) = 10 \cdot (\lg s)^2 \quad (22)$$

Az (22) egyenletet behelyettesítve az (21) egyenletbe megkapjuk a 2,5D modell hőmérsékleteloszlás függvényét; (23) egyenlet:

$$T(y; z; t) = T_0 + \frac{q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{v}} \cdot \frac{1}{10 \cdot (\lg s)^2} \cdot \frac{1}{(v^2 \cdot t^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{4}}} \cdot \exp\left(-\lambda \cdot v \cdot (\sqrt{v^2 \cdot t^2 + y^2 + z^2} - v \cdot t)\right) \quad (23)$$

A modell ebben a formájában nagyon bonyolult és a gyakorlat szempontjából nem igazán a használható. A szerző a modelljét ugyanúgy egyszerűsíti, mint ahogy az a 2D és a 3D modelleknél történt. A varrat középvonalára számolja a hőmérsékleteloszlást, azaz  $y=0$  and  $z=0$  értéket veszi fel. Ezáltal a (23) egyenletben, az exponenciális tag 1-é válik és az alábbi alakot ölti; (24) egyenlet ([3] p.191.)

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{20\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{\lg s} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1}{2}}} \quad (24)$$

A jelen dolgozatban a levezetést általánosabb formájában, a vastagságot kifejező függvényt nem konkretizálom az (22) egyenlettel megadott kifejezésre. Ebben az esetben a varrat középvonalának hőmérséklet eloszlás függvényét a (25) egyenlet fejezi ki:

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{f(s)} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1}{2}}} \quad (25)$$

Ennek a módszernek egyik nagy előnye, hogy a számítások nagyon hasonlóak a vékony lemez modell esetéhez (2D). Sőt ellenőrzésre is használható, hiszen  $f(s)=s$  esetében vissza kell adni a 2D modell eredményeit. A lehülési sebességet az (26) egyenlet adja:

$$\varpi(T) = -2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{(T(t) - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v}\right)^2} \cdot \{f(s)\}^2 \quad (26)$$

Hasonlóképpen a 2D és 3D modellekhez, ebben az esetben is ki lehet számítani a  $T_1$  és  $T_2$  a hőmérséklettartományban lehüléshez szükséges időt a (13) egyenlet alapján. A 2,5D modellben lehülési időt a (27) egyenlettel lehet kiszámítani:

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\{f(s)\}^2} \cdot \left(\frac{q}{v}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{(T_2 - T_0)^2} - \frac{1}{(T_1 - T_0)^2}\right) \quad (27)$$

A 2,5D és 3D a vastagsági határát a (14) és (27) egyenletek egyenlőségéből lehet meghatározni. Az egyszerűsítések után kifejezve, határvastagság adott a 2,5D modellhez az alkalmazott vastagságfüggvény inverzfüggvényeként jelenik meg. Ezt fejezik ki az (28) egyenlet:

$$s_{2,5D|3D} = f^{-1} \left( \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v} \cdot \left(\frac{1}{T_2 - T_0} + \frac{1}{T_1 - T_0}\right)} \right) \quad (28)$$

Természetesen a fenti egyenlet visszaadja 2D modellt, amelyre az  $f(s)=s$  összefüggés igaz, ekkor az (28) egyenlet a (17) egyenletbe megy át, azaz 2D és 3D modellek határvastagságát írja le. A (25) egyenlettel leírt modellt beírva az (28) egyenletbe, akkor megkapjuk a Kirk-modell által kifejlesztett 2,5D és 3D modell határvastagságát (azért, hogy a kitevő jól látszódjon az  $\exp_{10}$  jelölést használtam a 10-es hatványalap jelölésére), (29) egyenlet; ([10] p.46):

$$s_{2,5D|3D} = \exp_{10} \left( \sqrt[4]{\frac{1}{200} \cdot \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v} \cdot \left(\frac{1}{T_2 - T_0} + \frac{1}{T_1 - T_0}\right)} \right) \quad (29)$$

Az általánosított 2,5D modellről a lehülési idő függvény az adott 2,5D modellhez alkalmazott vastagság függvény másodfokú függvénye; (30) egyenlet:

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D|3D)} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2 - 2 \cdot T_0} \cdot \{f(s_{2,5D|3D})\}^2 = k_{2D|3D} \cdot \{f(s_{2,5D|3D})\}^2 \quad (30)$$

$=k_{2D|3D}$

Ha az (22) egyenletet behelyettesítve az (30) egyenletbe, akkor megkapjuk a Kirk-modell lehülési idő függvény 2,5D és 3D vastagsági határ közötti összefüggést; (31) egyenlet:

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D|3D)} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2 - 2 \cdot T_0} \cdot 100 \cdot (\lg s_{2,5D|3D})^4 = 100 \cdot k_{2,5D|3D} \cdot (\lg s_{2,5D|3D})^4 \quad (31)$$

$=k_{2,5D|3D}$

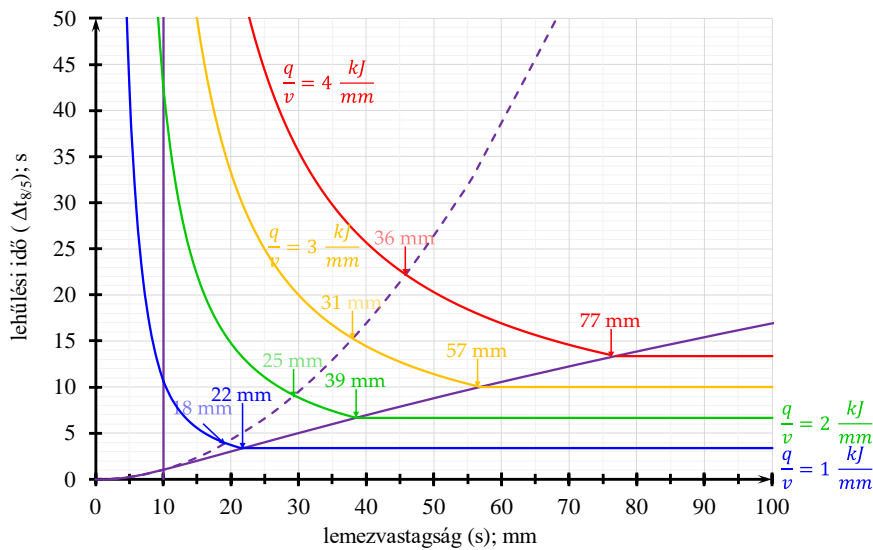
A (31) egyenlet alapján jól látható, hogy a lehülési idő függvénye 2,5D és 3D vastagsági határ logaritmusának negyedfokú függvénye.

Az általánosított 2D és 2,5D vastagsági határát a (15) és (31) egyenlettel egyenlőségéből lehet meghatározni. Az egyszerűsítések után, általában egy úgynevezett transzcendens egyenletet kapunk. Ez nem megoldható hagyományos

algebrai eszközökkel, ezért a numerikus módszert kell alkalmazni. Jelen esetben mivel csak valós gyököket kell megtalálni, ezért a leggyakrabban alkalmazott eljárás az úgynevezett Newton-Raphson módszert. Ezért az harmadfokú egyenletet nullára rendezve, és egy függvényként kezeljük, amelynek a zérushelyeit keressük. A számításaim eredménye, hogy a függvénynek három páratlan zérushelye van: körülbelül 0,5; 5,6 és 10 mm-s értékeknél. Ezek közül a legutolsót a 10 mm tekintik a 2 és 2,5D közötti határvastagságnak, amely nem függ a fajlagos energiabeviteltől.

Ezek alapján 2D, 3D és 2,5D alapján elvégzett számításokat a 1. ábrában tüntettem fel. A számításokhoz használt fizikai paramétereket a 1. táblázat tartalmazza. A szaggatott és a pontozott az érvényességi tartományon kívül lévő pontokat ábrázolja. A szakirodalmakban csak az érvényességi tartományt szokták feltüntetni, viszont ez az ábra az érvényességi tartományon kívüli ábrázolással azt is megmutatja, hogy a 2D és 3D modellek mennyire térnek el az adott intervallumokon. A 1. ábra jól visszaadja a szakirodalmak által publikált eredményeket ([2] p.52. [16] p.43.). A számításnál fajlagos hőbevitelt a vonalakon tüntettem fel olyan színnel, amilyen az adott hőbevitelhez tartozó vonalak. A 2 és 3D közötti határvastagságot lila színnel jelöltem az ábrában. A görbén jól látszik a parabolikus jelleg.

Az ábrában feltüntettem a számolt fajlagos hőbevitelhez tartozó határvastagságot látható, hogy 1 kJ/mm-nél 18 mm, amíg 4 kJ/mm-nél ez nagyjából a kétszerese 36 mm.



1. ábra

A vastagság és a hűlési idő összefüggése 850...500 °C-on 2; 2,5 és 3D esetén

1. táblázat A számításokhoz használt fizikai paraméterek értékei

Fizikai mennyiség megnevezése		
Megnevezése	jele	értéke
Hővezetési tényező:	$\lambda$	$48 \frac{W}{m \cdot K}$
Térfogategységre vonatkoztatott hőkapacitás	$c \cdot \rho$	$5,2 \frac{MJ}{m^3}$
Hőmérsékletvezetési szám:	$a$	$8,03 \frac{m^2}{s}$

A modellek másik ábrázolási módja a folyamatos hőbevitel logaritmusát ábrázoljuk a lehülési idő logaritmusának függvényében.

A vastag lemezre (3D modell) vonatkozó (14) egyenlet logaritmusát véve az (32) egyenlet adódik

$$\lg \frac{q}{v} = \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(3D)} - \lg \left( \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \frac{1}{T_2 - T_0} - \frac{1}{T_1 - T_0} \right) \right) = \lg \frac{q}{v} - k_{3D} \quad (32)$$

A könnyen belátható, hogy fenti egyenletnek a függvényképe a logaritmus lehülési idő  $-\frac{q}{v}$  logaritmusának koordinátarendszerében egy egyenes, amelynek ordinátatengely metszete mínusz  $k_{3D}$  és a meredeksége pedig 1.

A vékony lemezre (2D modell) vonatkozó (15) egyenlet logaritmusát véve pedig az (33) egyenlet adódik:

$$\lg \frac{q}{v} = \frac{1}{2} \cdot \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(2D)} - \frac{1}{2} \cdot \lg \left( \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \left( \frac{1}{(T_2 - T_0)^2} - \frac{1}{(T_1 - T_0)^2} \right) \right) + \lg s \quad (33)$$

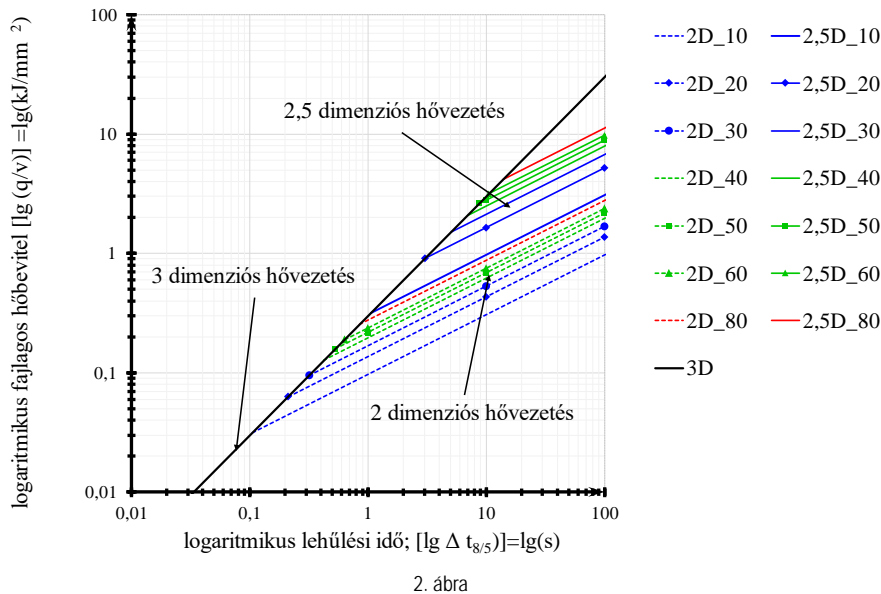
$$= \frac{1}{2} \cdot \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(2D)} - k_{2D} + \lg s$$

A középvastag lemezre (Kirk-féle 2,5D modell) a (30) egyenlet logaritmusát képezve, figyelembe véve a (22) egyenletet, a (34) egyenlet adódik:

$$\lg \frac{q}{v} = \frac{1}{2} \cdot \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} - \frac{1}{2} \cdot \lg \left( \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \left( \frac{1}{(T_2 - T_0)^2} - \frac{1}{(T_1 - T_0)^2} \right) \right) + 1 \quad (34)$$

$$+ 2 \cdot \lg \lg s = \frac{1}{2} \cdot \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} - k_{2D} + 1 + 2 \cdot \lg \lg s$$

Hasonlóképpen egyenesek adódnak a 2D és 2,5D modellből. A 2 és 2,5D egyenesek meredeksége is  $\frac{1}{2}$ . A két modellben az eltérés csak az ordinátatengely metszetekben van. A tengelymetszetek két tagból áll: az egyik a fizikai paramétereket tartalmazó állandó, amelyet  $k_{2D}$ -vel jelöltem. A másik a lemeztvastagságtól függ, a 2D-s esetben a vastagság logaritmusának kétszerese, a 2,5D-s esetében a vastagság kétszeres logaritmusának mínusz kettő.



2. ábra  
A lehülési idő logaritmusának szakaszenergia logaritmusának függvényében  
(A 2,5D egyenesek a Kirk-modell alapján számolva)

Ezeket az egyeneseket mutatja a 2.ábra. Jól látható, hogy a fekete vastag vonallal jelölt 3D modellnek egyetlen vonala van, hiszen ebben az esetben a lehülési idő nem függ a munkadarab vastagságától. Jól látszik továbbá, hogy 2 és 2,5D modell összes egyenese párhuzamosan egymással, hiszen  $\frac{1}{2}$  meredeksége. A diagramból kiolvasható továbbá, hogy 10 mm-es lemeztvastagsághoz tartozó 2D és 2,5D modell egyenese ugyanaz (neonzöld vonal). Ez természetesen is, mert ez a 2,5D modell tulajdonképpen a 2D modell azonos csak a vastagsági függvényben van eltérés (az pedig a tengelymetszetben jelenik meg).

### 4.3 Saját fejlesztésű modell

A Kirk-féle 2,5D modell a vékonylemezes modellt veszi alapul, és ahhoz igazítja a modelljét. Továbbá a 2D modell lévő a vastagsági függvényt az (22) egyenlettel megadott összefüggéssel veszi figyelembe. Ezt a modellt úgy lehet legegyszerűbben általánosítani, hogy olyan függvényt keresünk, amely  $s=0$  esetén a kétdimenziós modellt, és  $s \rightarrow \infty$  esetén pedig a háromdimenziós modellt adja vissza. Továbbá, ezzel a függvénnyel a módosított modellnek meg kell felelnie a dimenzióanalízis által támasztott követelményeknek is.

Ez is járható kutatási iránynak tűnik, de akkor már az egész modellt célszerű újra gondolni.

A modellek felépítésének logikáját megtartva, az új modellt heurisztikus módon építjük fel úgy, hogy mind a két-, mind a háromdimenziós modellt egy egyenlettel lehessen felírni, és kiterjeszhető legyen a 2,5 dimenzióra is. Ha bevezetjük dimenzió számot (D), amelyet racionális számokra is értelmezünk, akkor a kétdimenziós esetben (D=2) hőmérséklet idő függése a varrat közepén (15) egyenlet átalakításával a következőképpen lehet felírni,

(35) egyenlet:

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2 \cdot \pi^{\frac{3-D}{2}}} \cdot \frac{1}{(\lambda \cdot c \cdot \rho)^{\frac{3-D}{2}}} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{s^{3-D}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{3-D}{2}}} \quad (35)$$

Háromdimenziós esetben (D=3) pedig a (14) egyenlet átalakításával (36) egyenlethez jutunk:

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2 \cdot \pi^{D-2}} \cdot \frac{1}{\lambda^{2-D} \cdot (c \cdot \rho)^{\frac{3-D}{2}}} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{s^{3-D}} \cdot \frac{1}{t^{2-D}} \quad (36)$$

A két modell egyesítése a hőmérséklet időfüggvény dimenzió függését adja meg; (37) egyenlethez:

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2 \cdot \pi^{\frac{D-1}{2}}} \cdot \frac{1}{\lambda^{\frac{D-1}{2}} \cdot (c \cdot \rho)^{\frac{3-D}{2}}} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{s^{3-D}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{D-1}{2}}} \quad (37)$$

A fenti egyenlet visszaadja, mind a vékony lemezre, mind a vastaglemezre a már korábban meghatározott összefüggéseket. Az közepes vastagságú lemez esetében a D értéket 2,5-nek választjuk, akkor a (37) egyenletből megkapjuk a (38) egyenletet:

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{2 \cdot \pi^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{1}{\lambda^{\frac{3}{4}} \cdot (c \cdot \rho)^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{s^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{3}{4}}} \quad (38)$$

A dimenzió analízissel ellenőrizhető, hogy (38) egyenletnek valóban hőmérsékletdimenziója van. A számítás menete ugyanúgy történik, mint az eddigi levezetése során. A lehülési sebességet (39) egyenlet adja meg:

$$\varpi = -\frac{3\sqrt[3]{2}}{2} \pi \cdot \lambda \cdot (c \cdot \rho)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{(T(t) - T_0)^{\frac{7}{3}}}{\left(\frac{q}{v}\right)^{\frac{4}{3}}} \cdot s^{\frac{2}{3}} \quad (39)$$

Hasonlóképpen az eddigi modellekhez, ebben az esetben is ki lehet számítani a  $T_1$  és  $T_2$  a hőmérséklettartományban lehüléshez szükséges időt a (16) egyenlet alapján. A 2,5D modellben lehülési időt a (40) egyenlettel lehet kiszámítani:

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} = \frac{1}{2\sqrt[3]{2}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{(c \cdot \rho)^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{1}{s^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{q}{v}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left( \frac{1}{(T_2 - T_0)^{\frac{4}{3}}} - \frac{1}{(T_1 - T_0)^{\frac{4}{3}}} \right) \quad (40)$$

Azért, hogy a fenti formula áttekinthetőbb legyen, ezért az fizikai paramétereket és a hőmérsékletfüggvényt egy állandóban foglalom össze, (41) egyenlet, és egyszerűsített alakot a (42) egyenlet adja:

$$C_{2,5D} = \frac{1}{2\sqrt[3]{2}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{(c \cdot \rho)^{\frac{1}{3}}} \cdot \left( \frac{1}{(T_2 - T_0)^{\frac{4}{3}}} - \frac{1}{(T_1 - T_0)^{\frac{4}{3}}} \right) \quad (41)$$

$$\Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} = C_{2,5D} \cdot \frac{1}{s^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{q}{v}\right)^{\frac{4}{3}} \quad (42)$$

A (42) egyenletet logaritmusát véve megkapjuk (43) egyenletet.

$$\lg \frac{q}{v} = \frac{3}{4} \cdot \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} - \frac{3}{4} \cdot \lg C_{2,5D} + \frac{1}{2} \lg s \quad (43)$$

A jelleghelyes ábrázolásához a 1.táblázatban megadott fizikai paraméterek értékeivel számoltam továbbra is, így  $C_{2,5D} = 24,050585 \frac{mn^2 \cdot s}{k^{\frac{4}{3}}}$  értékre adódott. Ezt az értéket behelyettesítve a (43) egyenletbe, a konkrét esetre vonatkozó, a (44) egyenlettel megadott: egyenes egyenletet kapjuk:

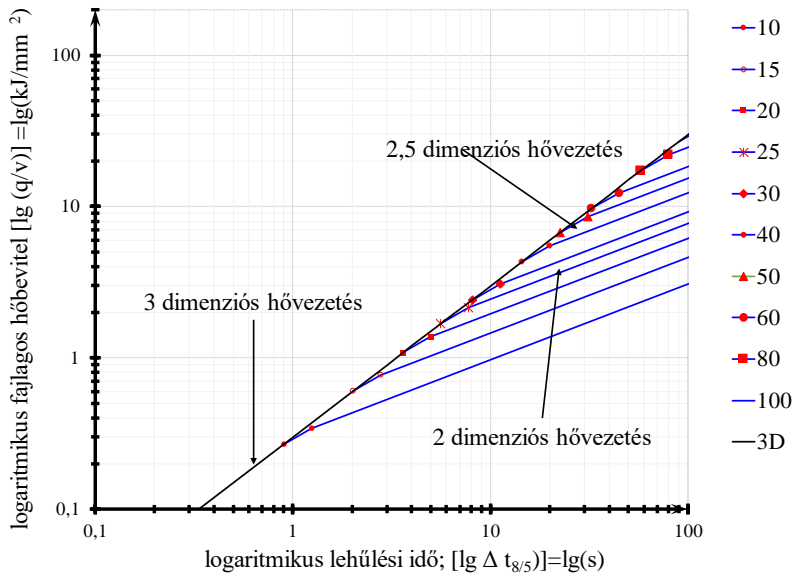


(44)

$$\lg \frac{q}{v} = \frac{3}{4} \cdot \lg \Delta t_{T_1/T_2}^{(2,5D)} + \frac{1}{2} \lg s - 1,035844$$

A vastagsági értékekre továbbra is a 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 100 mm értékeket választottam. A számítások eredményét a 3. ábrában ábrázoltam. Az egyenesek metszéspontjai az adott hővezetési modell (2D; 2,5D és 3D) érvényességi tartományát is kijelölik. Az ábrában minden egyenest csak abban tartományban ábrázoltunk, ahol az érvényes.

A fenti ábrában a 2,5D és 3D modellre vonatkozó egyeneseket is ábrázoltam, az ugyanaz a 2D modell összes egyenese párhuzamosan egymással  $\frac{1}{2}$  meredekséggel, a 3D modellnek csak egy egyenese van, mert az független a vastagságtól, és a meredeksége 1. A számítások eredménye egy törtvonal, amelynek a piros jelölők között lévő része a 2,5D modell egyenese (a meredeksége  $\frac{3}{4}$ ).



3. ábra

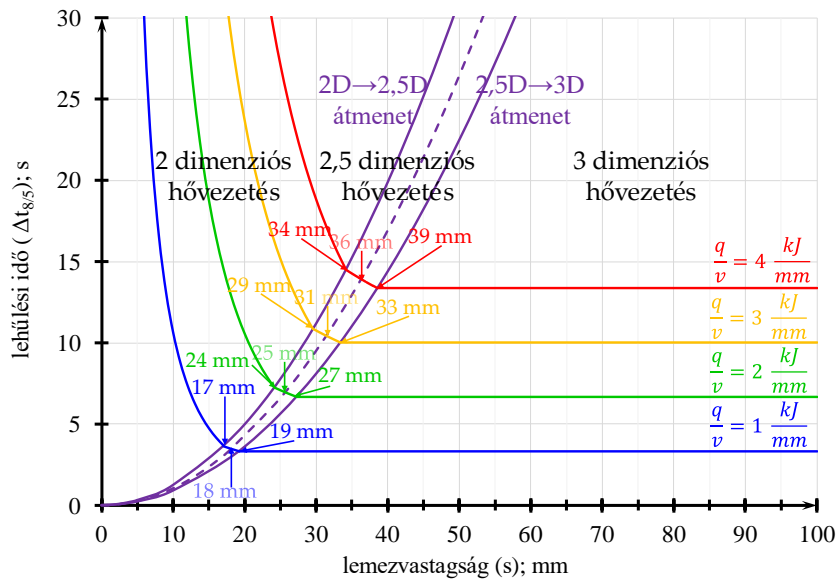
A lehülési idő logaritmusára folyamatos hőbevitel logaritmusának függvényében  
(A 2,5D egyenesek a saját modell alapján számolva)

A 2,5D és 3D valamint közötti határvastagságot pedig a (45) illetve (46) egyenletek adják:

$$s_{2,5D|3D} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{\left( (T_1 - T_0)^{\frac{4}{3}} - (T_2 - T_0)^{\frac{4}{3}} \right)^3}{(T_2 - T_0) \cdot (T_1 - T_0) \cdot (T_1 - T_2)^3}} \quad (45)$$

$$s_{2|2,5D} = 4 \cdot \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{(T_1 - T_2)^{\frac{3}{2}} \cdot (T_2 - T_0)^{\frac{1}{2}} \cdot (T_1 - T_0)^{\frac{1}{2}}}{\left( (T_1 - T_0)^{\frac{1}{3}} - (T_2 - T_0)^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (46)$$

A számítások eredményeit a 4. ábrában tüntettem fel. Az (45) és (46) egyenletek és az 4. ábra alapján megállapítható, hogy a határvastagságok mind a 2,5 és 3D esetében, függenek az anyagra jellemző fizikai állandóktól (térfogatra vonatkoztatott hőkapacitás, és a sűrűség) és hegesztési paraméterektől a fajlagos hőbevitel és az előmelegítési hőmérséklet. A modell adottságaiból adódóan csak egy szűk kb. 2-5mm-es tartományra terjed ki. Jelenlegi szerepe, hogy a 2 és 3 dimenzió éles átmenetét lankásabbá teszi.



4. ábra A vastagság és a hűlési idő összefüggése 850...500 °C-on 2; 2,5 és 3D esetén

A további kutatást igényel, hogy ez a 2,5 dimenziós modell szélesebb tartományra is kiterjeszhető-e.

## 5. Összefoglalás

A dolgozat első részében a hegesztést, mint hőtani folyamatot röviden tárgyalja. Bemutatja a legfontosabb elsősorban külföldi és magyar szakirodalmat, visszakövetve a kutatási témát a legkorábbi szerzőkre.

A fő részt viszont a 2,5D modell bemutatása, elemzése teszi ki. Ezek alapján a következő elmondható, hogy Kirk-féle modell a klasszikus kétdimenziós átalakításával született meg, hogy a test vastagságát, helyett annak 10-es alapon vett logaritmus függvény négyzetét vette, amelyet megszorozott egy tízes szorzóval. A választást legfőbbképpen az indokolta, hogy 2 és 2,5D modell határvastagsága 10 mm legyen. Az elemzéseim megmutatták, hogy a határvastagságot kifejező függvénynek három valós zérushelye van, amelyek véleményem szerint ugyanúgy szoba jöhetnek a határvastagságként. A dolgozatban a vastagot kifejező függvényt általános formában kezeltem. A modellt ebben az irányban is tovább lehetett volna fejleszteni olyan módon, hogy a függvénynek a  $s \rightarrow \infty$  esetén visszaadja a háromdimenziós modellt.

Ebben az esetben viszont már egyszerűbb volt egy új modellt alkotni. A modell arra épül, hogy a határátmenetben visszaadja a két és háromdimenziós hőmérsékletmezőt a varrat középpontjában. Ezért vezettem be a dimenziót jelző számot, amelyet viszont nem csak egész számokra, hanem a racionális számokra is értelmeztem. A modellem heurisztikus jellegű nem csak a két és háromdimenziós átmenetben lehet rá felírni a mérlegegyenletekből származó differenciálegyenlet.

Az általam kidolgozott modell erőssége, hogy nincs szüksége dimenzió korrigáló faktor beiktatására. Csak olyan fizikai paraméter használt, ami a mérnöki gyakorlatban általánosan elfogadott. Ez volt a modell felírásának a célja.

A modellhez tartozó számítások kicsivel, mint bonyolultabb, mint a 2D és 3D modellek esetében. A zárt logikai láncba fűzött levezetés, különösen a hozzátartozó dimenzióanalízissel alátámasztva megerősítette azt a nézetemet, hogy nem csak egész számra vonatkoztatott dimenzióknak lehet szerepe a mérnöki számításoknál.

## Irodalomjegyzék

- [1] Radaj, D (1992): Heat effect of Welding. Temperature Field, Residual Stress, Distorsion. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- [2] Romvári P (1974): Hegesztéstechnológia I. rész (A hegesztés fizikai és metallurgiai jellemzői), Tankönyvkiadó, Budapest

- [3] Rikalin, N.N (1951): Расчеты тепловых процессов при сварке (magyarul: A hőfolyamatok számítása a hegesztés során) Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва. (Állami Mérnöki Irodalom Tudományos és Műszaki Kiadója. Moszkva.)
- [4] Czibere T. (1998): Vezetékes hőátvitel. Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc
- [5] Taler, J. et al (2006): Solving Direct and Inverse Heat Conduction Problems. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- [6] Rosenthal, D (1941) Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting, Welding Journal Vol. 20 p. 220-234
- [7] Karkhin, V. A (2019): Thermal Processes in Welding. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- [8] Szunyogh L. szerk. (2007) Hegesztés és rokon technológiák kézikönyv, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest
- [9] Kirk C.S (1997): Improvements in quality through weld thermal cycle modelling. Ph.D thesis, University of Bath
- [10] Balogh András - Kirk, Christopher S. - Görbe Z.: Role of cooling time when steels to be welded require controlled heat input. In: Gép. 1999. (50. évf.) 5. sz. p. 44-50.

# AZ 1.4404-ES ACÉL DIÓDA LÉZERES HEGESZTÉSE

## DIODE LASER WELDING OF 1.4404 STEEL

### Laki Márk

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépészmérnöki és  
Biztonságtechnikai Kar  
1081, Budapest, Népszínház utca 8.  
laki.mark.lm@gmail.com

### Fábián Enikő Réka

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépészmérnöki és  
Biztonságtechnikai Kar  
1081, Budapest, Népszínház utca 8.  
fabian.reka@bkg.uni-obuda.hu

### Draskóczi László

Budai Benefit Kft.  
Halásztelek, Páger Antal u. 4, 2314  
draskoczilaszlo@bubenlaser.com

*Az erősen ötvözött ausztenites acélok lézerhegesztése hagyományos gázlézerekkel nagyon problematikus, mivel ezen acélok reflexiója 10,6  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszon nagyon erős az ötvözetlen acélokhoz viszonyítva, míg a  $\lambda=0,808\text{-}0,980$   $\mu\text{m}$ -es hullámhosszon működő diódalézerekkel az ausztenites acélok abszorpciója jelentősen megnő. A diódalézerek különösen ideálisak lézer-robot rendszerek építéséhez, mivel jó teljesítményük, élettartamuk és hatékonyságuk különösen produktív gyártási módszert eredményez. E dolgozathoz kapcsolódóan vizsgáltuk a lézerteljesítmény és a sebesség hatását a hegesztett varrat tulajdonságaira. Az eredeti hegesztési sebességeket megtartva további kísérleteket végeztünk másodlagos lézersugaras hegesztés alkalmazásának hatástanulmányozása céljából. A hegesztett kötések értékelésére elsődlegesen 2D-s CT vizsgálatokat végeztünk. A varratok mikroszerkezetét fénymikroszkóppal vizsgáltuk, a mechanikai tulajdonságokat pedig szakítóvizsgálattal ellenőriztük. A darabok korrózióvizsgálatát ASTM 48 szabvány szerint végeztük.*

*Laser welding of highly alloyed austenitic steels with conventional gas lasers is very problematic because the reflection of these steels is much stronger than that of unalloyed carbon steels at wavelengths of 10.6  $\mu\text{m}$ , while the absorption of austenitic steels increases significantly with diode lasers operating at wavelengths of  $\lambda=0.808\text{-}0.980$   $\mu\text{m}$ . Diode lasers are particularly ideal for building laser-robot systems, with good performance, lifetime and efficiency resulting in a particularly productive manufacturing method. There were studied the laser power and speed effect on the weld metal properties. Additional tests were performed by applying secondary laser beam welding in the previous welding speed. To evaluate the weld metals characteristics 2D computer tomography were used. The microstructure of the seams were examined using light microscope, and the mechanical properties were checked by tensile testing. Finally, a corrosion test was carried out on the pieces according to ASTM 48.*

## 1. Bevezetés

Az ausztenites acélminőségekre általánosan elmondható, hogy ők a legáltalánosabban elterjedt saválló acélok, nagyon jól megmunkálhatóak, hidegen és melegen is jól alakíthatóak, nem mágnesezhetőek, jól polírozhatóak, rosszul vezetik a hőt, hegeszthetőségük pedig az összetételüktől jelentősen függ [1-4]. Mivel a legszélsőségesebb környezeti közegekben is lényegesen jobb az ausztenites hő és korrózióálló acélok korrózióval szembeni ellenállása, mint a martenzites vagy ferrites acéloké, ezért a hegesztett szerkezetek legalább 10%-a ausztenites korrózióálló acélból készül. Az 1.4404-es saválló acél az egyik leginkább elterjedt az ausztenites acélminőségek közt. Jellemző ezekre az erősen ötvözött acéllemezekre a jó megmunkálhatóság, jól hegeszthető, hidegen és melegen is alakítható, korrózió állósága kitűnő, és jól polírozható. A felsorolt előnyös tulajdonságai miatt elsősorban a vegyiparban, az élelmiszeriparban, az atomenergiaiparban alkalmazzák olyan területeken, ahol a kiváló korrózióállóság mellett jelentősök a mechanikai igénybevételek is [2-3]. A 18-8 típusú ausztenites rozsdamentes acélok hegeszthetőek, és a hegesztett kötések meleg repedés érzékenysége csökkent az acél és a fogyóanyagok nagy metallurgiai tisztasága, valamint a hegesztés során minimális hő alkalmazása miatt. Hasonlóképpen, az ausztenites acélok és a fogyóanyagok szénttartalmának 0,01% alá csökkentése megakadályozza, a hegesztett kötések interkristalin korróziójának jelenségét. Az egyetlen probléma a hegesztés közbeni hőtorzulás minimalizálása, különösen vékony acéllemezek hegesztése esetén, az ausztenites acélok nagy hőtágulása (kb.  $18 \times 10^{-6}$  1/K) és a nagyon alacsony hőellenállás miatt a hővezető képessége (kb. 15,5 W/m K) miatt [3-4]. A rozsdamentes acélok széles körének

hegeszthetőségével kapcsolatos korábbi tanulmányok kimutatták, hogy a jó hegesztési minőség biztosításának alapvető előfeltétele a hegesztett kötések minőségének biztosítása és a termikus torzulás minimalizálása a hegesztésbe bevitt hőmennyiség csökkentésével, és az ausztenites rozsdamentes acélok hegesztett kötéseinek legmagasabb minőségét csak a lézerhegesztési folyamat megfelelő paraméterekkel történő optimalizálásával lehet biztosítani [5-8]. A lézersugaras eljárások közös tulajdonsága, hogy a hőbevitel és a hőelvitel az abszorpciós és geometriai viszonyok is befolyásolják. Ahogy azt az irodalmi adatok mutatják [9] acéloknál a CO<sub>2</sub> lézersugaras kezeléskor a lézersugár abszorpciója 10% körül, míg diódalézer alkalmazásával ez 30%-ra nő. A felület minősége szintén jelentősen befolyásolja a lézersugár abszorpciós tényezőjét, de míg a CO<sub>2</sub> lézersugaras kezeléseknél 4-80% között változik, addig a szilárdtest lézersugaras kezeléseknél még polírozott felületnél is eléri a 30%-ot [10].

## 2. Kísérleti anyag és technológia

A vizsgálatainkhoz 1,5 mm vastagságú molibdénrel ötvözött ausztenites acélt használtunk. Ennek az acélnak az összetétele C<sub>max</sub>= 0,03%, Si<sub>max</sub>= 1,00%, Mn<sub>max</sub>= 2,00%, P<sub>max</sub>= 0,045%, S<sub>max</sub>= 0,01%5, N=0,11%, Cr =16,6-18,5%, Mo= 2,0-2,5%, Ni= 10,0-13,0%. A próbadarabokat a Budai Benefit Kft (BenLaser) halásztelki telephelyén található Reis robotjának segítségével készítettük. A robot 3 kW teljesítmény leadására képes, fix optikás. 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 próbadarabokat ezután szorosan illesztési hézag nélkül rögzítettük, majd a hegesztés során minden darab felületére pozicionáltuk a fókusz foltot, irodalmi adatoknak megfelelően [11-13]. 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 szöveget zárt be a munkadarabbal. A lézervarratok készítésekor monitoron követhető a hegfürdő hőmérséklete, mely végig 1400°C és 1500°C között volt. A lézersugár által bevitt fajlagos energia függ az anyag abszorpciójától, a lézersugár teljesítményétől és a hegesztési sebességtől. Adott anyagnál, azonos felületi érdeségnél az általánosan értelmezett fajlagos hőbevitel vagy vonalenergia teljesítmény (P) és a relatív sebesség (v<sub>r</sub>) hányadosa, amely

$$\rho = \frac{P}{v_r} \left[ \frac{J}{\text{mm}} \right] \quad (1)$$

A teljesítmény (P) és a fókuszfoltméret (d<sub>f</sub>) négyzetének hányadosa a teljesítménysűrűség, amely egy fókuszgeometriai-faktort (Y) tartalmaz, amelynek értéke körfolt alak esetén 0,785, négyzetfolt esetén pedig 1 [14].

A vizsgálandó darabok hegesztése előtt egy azonos alapanyagú lemezen végeztünk próba hegesztéseket, vakvarratokat készítve, az ideális beállítások keresésére. Annak ellenére, hogy a hőelvezetés kismértékben változik az összeillesztett lemezeknél a bemetszés nélküli lemezhez képest- A1,5mm- vastagságú lemeznél az 1000-1200W-os teljesítmény megfelelőnek bizonyult 4+10m/perces hegesztési sebesség esetén, a 2,5mm-es lemezeknél szükség volt 2500-2700W-ra. A kísérlet sorozatunk jó alappal szolgált a szorosan illesztett lemezeink hegesztési paramétereinek választásához. Vizsgálni kívántuk a hegesztési sebesség hatását a varratok jellegére és azok környezetére kisebb és nagyobb lézer teljesítményen (1000-2700W). Annak kiderítésére, hogy egy utólagos lézersugaras energiaközlés befolyásolja-e a kialakult varratok alakját, jellegét 1000W,1200W és 2500 W-on is mindegyik hegesztési sebesség után készítettünk olyan varratot is, ahol 1000W-os teljesítmény mellett ismételt lézersugaras kezelést, un átolvasztást végeztünk. Az átolvasztás sebessége mindig megegyezett az előtte történt hegesztés sebességével bár ennek optimalizálása is megérne egy külön vizsgálatot.

A varratok minőségi hibáinak feltárása érdekében az összes varratot 2D-s CT-s vizsgálatnak vetettük alá. Vizsgálatainkhoz 2D és 3D vizsgálatra is alkalmas YXLON Cheetah FXE 160.51 típusú multifókuszú röntgen CT berendezést használtunk. A berendezés kialakítása olyan, hogy alkalmas 2D-s és 3D-s vizsgálatokra is. A 3D-s asztalnál x-tengely forog, ott kell lehetőleg tengelyszimmetrikusan forgatni a darabot. 2D-s asztalnál x-y tengely mozog. Mivel a berendezés max 160kV-on tud dolgozni, így főleg kis rendszámú elemek vizsgálatára alkalmas és relatív kis vastagságig. Mint ismeretes röntgenvizsgálatoknál a *csőből* jövő sugárzás intenzitása, áthatolva a testen, gyengül az (2) egyenlet szerint

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad (2),$$

ahol

μ-gyengülési együttható

d-az átvilágított falvastagság

$$\mu = \mu' + \sigma \quad (3)$$

ahol

$\mu'$ -elnyelődési együttható  
 $\sigma$ -szórt sugárzási együttható

$$\mu' = C \cdot \rho \cdot \lambda^3 Z^3 \quad (4)$$

ahol

C-állandó

$\rho$ -anyag sűrűsége

$\lambda$ -alkalmazott sugárzás hullámhossza

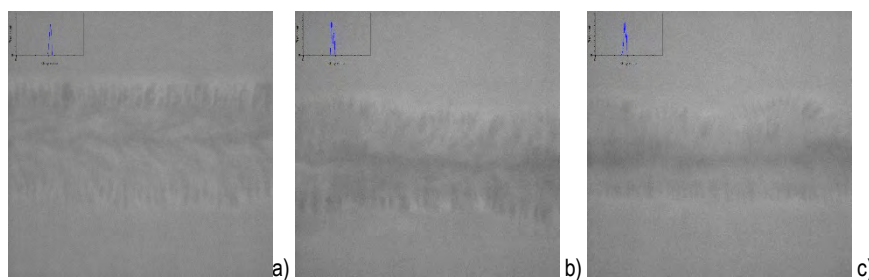
Z-rendszám

A szakító vizsgálatokat H&P WPM Retrofit 400KN szakítógépen végeztük. A vizsgálati mintákat a varratok elejétől 25 mm-re illetve a metallográfiai mintavételezésen belülről vettük ki az MSZ EN ISO 15614-1: 2017 szerint. Szövetszerkezeti vizsgálatok céljából a varratvégétől 25 mm-re vágtuk ki a 10x30mm méretű mintalemezeket, melyeket a varrat keresztmetszete szerint kétkomponensű műgyantába beágyazva készítettük elő a metallográfiai vizsgálatra. A csiszoláshoz P60-s, méhsejtes P240-s, P600-s, P1200-s és P2500-s szilíciumkarbid bázisú csiszolókorongokat használtunk, majd políroztuk 3  $\mu\text{m}$  és 1  $\mu\text{m}$ -s gyémántszuszpenzió alkalmazásával MD Nap típusú polír korongon. Mivel az ausztenites anyagok rendkívül érzékenyek az előkészítésre szükséges volt a polírozást 0,3  $\mu\text{m}$  és 0,05  $\mu\text{m}$  -es szemcsefinomságú  $\text{AlO}_3$  bázisú szuszpenzió használata is. Metallográfiai vizsgálataink során több marószert is kipróbáltunk. A Kalling'2 reagens hosszabb ideig tárolható, de az ausztenites szerkezet kimutatására jobban működik a bekeverés után gyorsan tönkre menő királyvíz. A szövetszerkezet vizsgálatokhoz Neophot 2 és DSX Olympus digitális mikroszkópokat használtunk. A korróziós tesztek az ASTM G48 szabvány szerint végeztük 6%-os  $\text{FeCl}_3$  vizes oldatban. Az elemzéseket 72 óra tesztelés után végeztük.

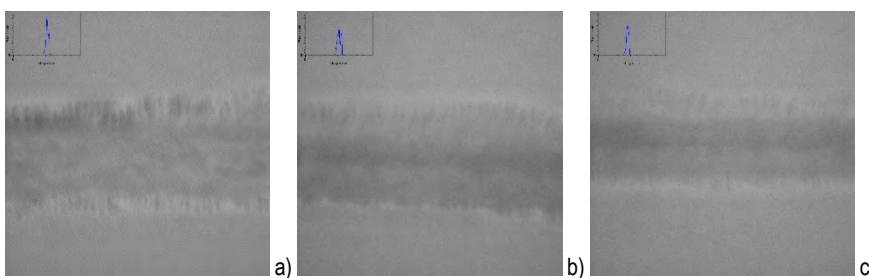
### 3. Vizsgálati eredmények

#### 3.1. CT vizsgálatok

Mivel CT vizsgálatok során lényegében a szűrkeségi skála alapján látható, ha nem történt meg a hegesztés, vagy jelentős a vastagságkülönbség, vagy idegen anyag került a varratba. Megfelelő beállítások mellett (feszültség, áramerősség, nagyítás, fókuszálási típus, képmínőség) láthatóvá vált a dermedés következtében kialakult irányítottág, a varratban megjelenő egyenetlenségek. A vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy a dermedéskor a középvonalban alakult ki a szemcsék találkozása. A kisebb sebességgel való hegesztéshor a szemcsék irányítottága kirajzolódik a hegesztés irányába (1. ábra).



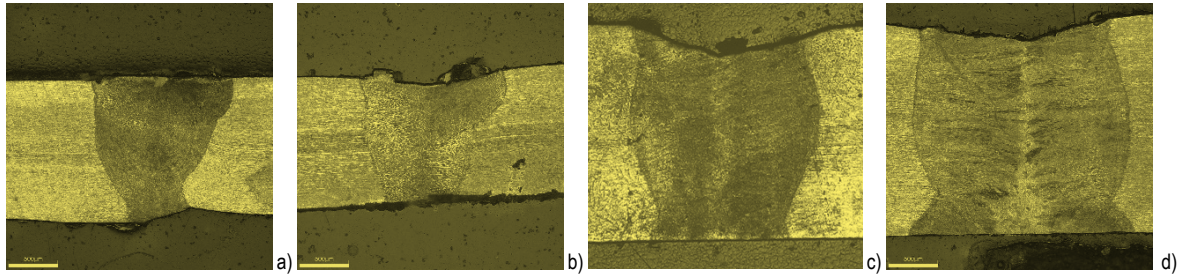
1. ábra. A hegesztési sebesség hatása a kialakuló varrat minőségére 2D-s CT vizsgálatok alapján,  $N_{eredeti}=20x$   
a) 2500 W\_5 m/ min, N=20x b) 2500 W\_6 m/ min c) 2500 W\_8 m/ min



2. ábra. Az ismételt lézergusaras hegesztés hatása a kialakuló varrat minőségére 2D-s CT vizsgálatok alapján,  $N_{eredeti}=20x$   
a) 2500 W\_5 m/min+1000 W\_5 m/min b) 2500 W\_6 m/min+1000 W\_6 m/min c) 2500 W\_8 m/min+1000 W\_8 m/min

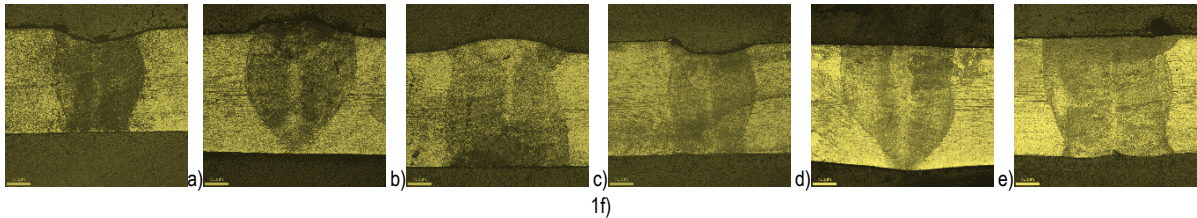
### 3.2. Metallográfiai vizsgálatok

Metallográfiai vizsgálatok során elsősorban a varratok megfelelő minőségét ellenőriztük, illetve az átolvasztás eredményére voltunk kíváncsiak. Az 1000 W-on hegesztett, 1,5 mm vastag lemezekre jellemző volt a V hez közeli varrat alak, a vastagabbaknál a hordós jelleg dominál (3. ábra).



3. ábra a varrat alak a lemezvastagság, lézerteljesítmény függvényében  
a) 1000 W\_10 m/min b) 1000 W\_8 m/min c) 2500 W\_10 m/min d) 2500 W\_8 m/min

Az 1000W-os átolvasztás jelentősen nem befolyásolta a varrat alakot, ahogy azt a 4. ábrán is láthatjuk.



4. ábra Az átolvasztás hatása a varrat alakra  
a) 2500 W\_10 m/min b) 2500 W\_8 m/min c) 2500 W\_6 m/min d) 2500 W\_10 m/min+1000 W\_10 m/min e) 2500 W\_8 m/min+1000 W\_8 m/min  
f) 2500 W\_6 m/min+1000 W\_6 m/min

Az 1. táblázatban láthatjuk a metallográfiai vizsgálatok alapján megállapított varrat alakot, illetve a varratok esetleges nem megfelelőségét (X-el jelölve).

1. táblázat. Hegesztési paraméterek

Hegesztési teljesítmény	Átolvasztási teljesítmény	Hegesztési sebesség	Varratalak	Metallográfia vizsgálatnak megfelel
1000 W	-	8 m/min	V	<input checked="" type="checkbox"/>
1000 W	-	10 m/min	V	<input checked="" type="checkbox"/>
1000 W	1000 W	8 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
1000 W	1000 W	10 m/min	V	x
1200W	-	6 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
1200 W	1000 W	6 m/min	V	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	-	5 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	-	6 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	-	8 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	-	8 m/min	V	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	-	10 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	1000 W	5 m/min	Tölcséres	x
2500 W	1000 W	6 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	1000 W	8 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2500 W	1000 W	8 m/min	V	x
2500 W	1000 W	10 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>
2700 W	-	5 m/min	Hordó	<input checked="" type="checkbox"/>

Elmondható, hogy a varratok majdnem minden esetben megfelelő minőségben jöttek létre. A hőhatásövezet a lézerhegesztésekre jellemző módon nagyon kicsi, bár szemcse durvulás megfigyelhető a nagy teljesítményen végzett hegesztések során. Metallográfiai vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy első átolvasztás során a varrat középvonalaiban, majdnem egyenes vonal mentén alakult ki a dermedő dendritek találkozási vonala (5. ábra), ami húzó igénybevételkor



5. ábra

2500 W 8m/min 100x nagyításban

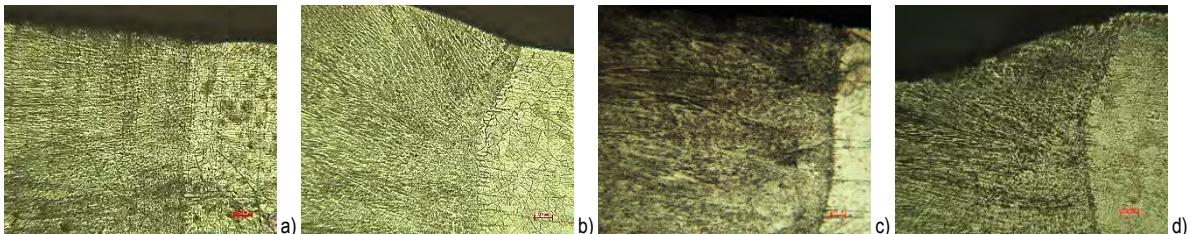


6. ábra

2500/1000 W 8 m/min 100x nagyításban

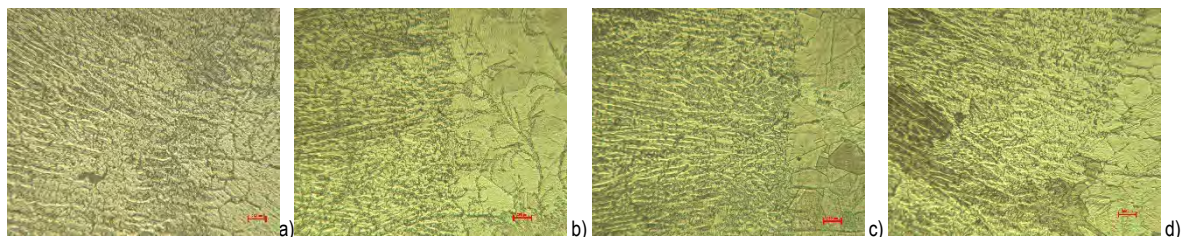
feltehetőleg gyenge pontnak minősül. Ahogy azt már a CT vizsgálatok alapján sejteni lehetett a másodlagos lézergusáras kezelés hatására ez a középső vonal equiaxiális szemcseszerkeztű zónává alakul (6. ábra).

A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy még a legnagyobb teljesítményeken való hegesztések után is nagyon keskeny a hőhatásövezet (7. ábra), delta ferrit tartalom csak a varratban mutatható ki (8. ábra).



7. ábra A 2,5 mm vastagságú lemezek hőhatásövezete egyszer áthegesztve 2500W-on különböző sebességekkel  $N_{eredeti}=100x$

a)  $v=5$  m/min b)  $v=6$  m/min c)  $v=8$  m/min d)  $v=10$  m/min 1x



8. ábra A 2,5 mm vastagságú lemezek hőhatásövezete különböző sebességekkel való kétszeri áthegesztés után (2500W+1000W)  $N_{eredeti}=500x$

a)  $v=5$  m/min b)  $v=6$  m/min c)  $v=8$  m/min d)  $v=10$  m/min 1x

### 3.3 Szakító vizsgálatok

Szakító vizsgálatnak hét hegesztett próbalemezből és egy alapanyagból kivett mintát vetettünk alá. a tesztek sorszámát és a z egyes tesztelésekhez tartozó hegesztési paramétert a 2. táblázatban láthatjuk. A szakításkor felvett diagramokat a 9. ábra mutatja.

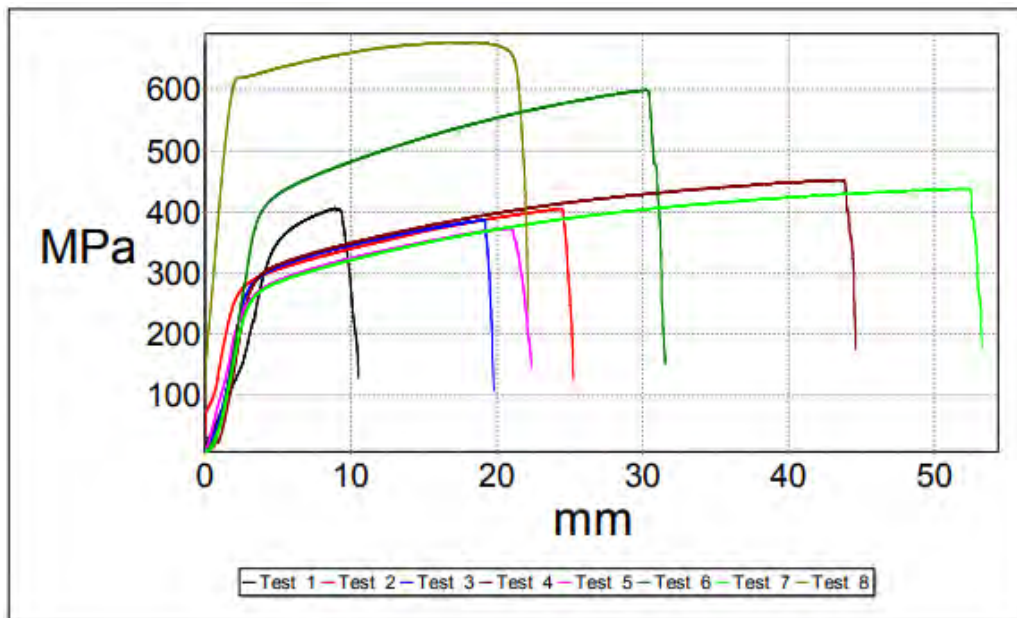


A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a szakadás helyei jellemzően a varratokban illetve a hőhatás övezetekben alakultak ki, és a szakítószilárdság sem érte el az alapanyagban mért szakító szilárdságot, de voltak olyan minták ahol a szakadáshoz tartozó alakváltozás igen jelentős volt.

2. táblázat. Szakítóvizsgálati eredmények

Sor szám	Vizsgált darab	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	Ag [%]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>m</sub> [MPa]
1.	2500/1000 W 8 m/min	50.3	2.5	12994.0	406.063
2.	1000 W 8 m/min	40.5	16.6	11768.0	405.793
3.	1000 W 10 m/min	9.8	11.0	8512.0	386.909
4.	1000/1000 W 8 m/min	13.0	31.1	9055.2	452.760
5.	1000/1000 W 10 m/min	8.1	11.8	9710.8	373.492
6.	1200/1000 W 6 m/min	8.9	18.0	13794.8	599.774
7.	2700 W 5 m/min	7.9	37.0	11394.4	438.246
8.	Alapanyag	103.0	12.4	15591.2	677.878

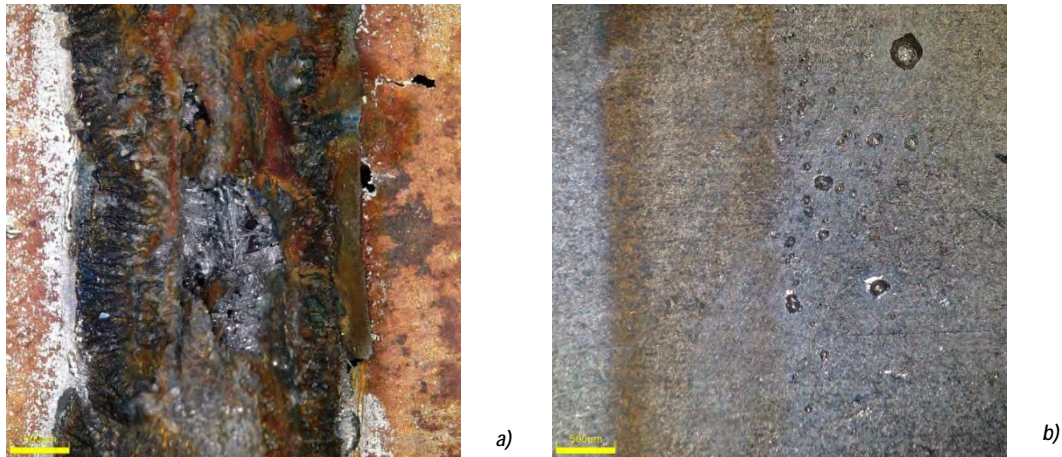
Az elvégzett próbák eredményeiből az látszik, hogy az alapanyaghoz képest a varrat jóval kisebb szakító szilárdsággal rendelkezik. Ennek megfelelően majdnem minden darab a varratban szakadt, bár a többinél jóval ígéretesebb 7-os teszt a hőhatás övezetben szakadt el.



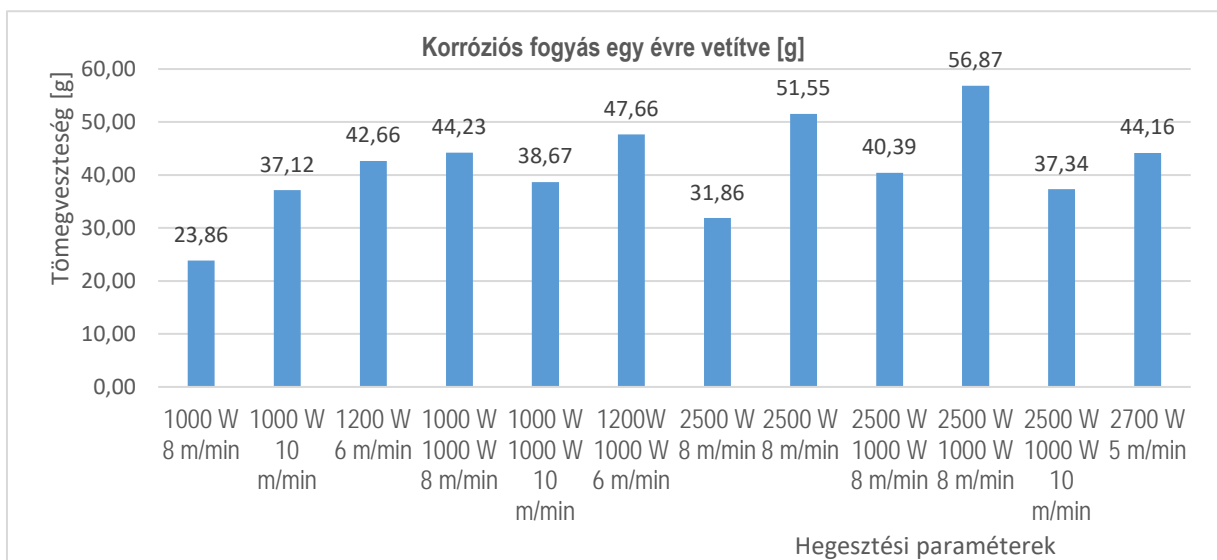
9. ábra Szakító diagram

### 3.4 Korróziós vizsgálat

A korróziós vizsgálatok során 3 napig erősen korrodáló közegben (6%-os vasklorid oldatban) tartottuk. Az így vizsgált daraboknál 24 óra elteltével még nem volt megfigyelhető korrózió, viszont a szabványnak megfelelően 72 óra korróziós kitettség után már mérhető volt a korróziós fogyás. Lyukkorrózió főleg a varratok szélén és a varratvonalak középső zónájában alakultak ki, de 72 óra után számos lyukat találtunk az alaplemez felületén, a hőhatás övezeten kívül is (10. ábra). Ez a magyarázata, hogy a korróziós fogyást akár éves szintre vetítve (11. ábra) egyértelmű összefüggés nem állapítható meg sem a hegesztési sebesség, sem a teljesítmény, sem a fajlagos energiabevitel és a fogyás kapcsolatáról, bár a keskenyebb varratok általában kevésbé korrodáltak, mint a szélesebb olvadék zónával rendelkező nagyobb fajlagos hőbevitellel hegesztett minták.



10. ábra A korrózió megjelenése 72 órás tesztelés után  
 a) lyukak a varratfém szélén és a varratban b) lyukak függetlenül a varrattól az alapanyagon lyuk korrózió



11. ábra. Korróziós fogyás egy évre vetítve

## 4. Összefoglalás

Az elvégzett vizsgálatok alapján elmondható, hogy minél kisebb a hegesztési sebesség annál szélesebb a varrat azonos vastagságú lemeznél és annál nagyobb a korróziós fogyás. Másodlagos átolvasztással sikerült a varratok középvonalában kialakuló találkozási vonalat egyenlőtengelyű szemcseszerkezetű zónává alakítani, miközben a kötések hőhatásövezete alig változott, és nem romlott jelentősen az alapanyag korrózióálló képessége. A szakítóvizsgálat rávilágított, hogy a varrat szakító szilárdsága messze elmarad legtöbb esetben az alapanyagétól. Az eredmények tükrében mindenképp további vizsgálatokra van szükség pontosítani mely paraméterek hozzák a legkedvezőbb eredményt.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet kívánnak mondani a Magyar Államnak, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak valamint az Európai Uniónak a No. 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00081 számú projekt támogatásáért.

## Irodalomjegyzék

- [1] A. Kurc-Lisiecka, M. Kciuk, The influence of chemical composition on structure and mechanical properties of austenitic Cr-Ni steels, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 61/2 (2013) 210-215.
- [2] PER-KOR Kereskedőház Kft., Rozsdamentes és hőálló acélok anyagismerete, <https://perkor.hu/rozsdamentes-es-hoallo-acelok-anyagismerete>
- [3] Bödök Károly: Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére, Corweld Kiadó, Budapest, 1997.
- [4] D.L. Olson, T.A. Siewert, S. Liu, G.R. Edwards (Eds.), *ASM Handbook*, vol. 6: Welding, Brazing, Soldering, ASM International, Materials Park, USA, 2014.
- [5] K.M. Hafez, S. Katayama, Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society* 27/2 (2009) 63-73. DOI: <https://doi.org/10.2207/qjws.27.69>
- [6] A. Lisiecki, A. Kurc-Lisiecka, Automated laser welding of AISI 304 stainless steel by disk laser, *Archives of Metallurgy and Materials* 63/4 (2018) 1663-1672. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2018.125091>
- [7] L. Li, The advances and characteristics of high power diode laser materials processing, *Optics and Laser Engineering* 34/4-6 (2000) 231-253. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(00\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(00)00066-X)
- [8] K. Manonmani, K.N. Murugan, G. Buvanasekaran, Effects of process parameters on the bead geometry of laser beam butt welded stainless steel sheets, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (2007) 1125-1133. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0432-7>
- [9] 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)
- [10] Lyubomir Lazov, N Angelov: Physical model about laser impact on metals and alloys, *Contemporary Materials I/ 2* (2010), 124-128;
- [11] A.-M. El-Batahgy: Laser Beam Welding of Austenitic Stainless Steels – Similar Butt and Dissimilar Lap Joints, *Welding Processes*, In Tech, 2012. doi: 10.5772/48756.
- [12] F. Kovács and E. R. Fábrián, Szövetszerkezeti változások ausztenites korrózióálló acéllemezek lézersugaras hegesztésekor, *Acta Materialia Transylvanica magyar kiadás*, pp. 81–85, 2020, doi: 10.33923/amt-2020-02-05.
- [13] Khalid M. Hafez, Seiji Katayama: Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 2009
- [14] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés, Erdélyi Múzeum Egyesület, Kolozsvár, 2007, ISBN 973-8231-66-3

# AUTOMATIZÁLÁS JÖVŐBE MUTATÓ FEJLESZTÉSEI – PIACI VERSENYELŐNYÖK

## FUTURE DEVELOPMENTS IN AUTOMATION – COMPETITIVE ADVANTAGES IN THE MARKET

**Lakos Szabina**  
Crown International Kft.

2142 Nagytarcsa, Alsó Ipari Krt.6 G.ép.

[lakos.szabina@cloos.hu](mailto:lakos.szabina@cloos.hu)

### Absztrakt

*Minden gyártóipari területen jelentős szerepe van az egyre növekvő piaci versenynek és vevői igényeknek. Az ipari cégek esetében az automatizálás irányába történő fejlesztés és beruházás az egyetlen lehetőség, ami gyors, dinamikus és rugalmas megoldást képes kínálni a megnövekedett gyártási igények kiszolgálására. Az automatizált hegesztés folyamatosan fejlődik, fejlesztés alatt állnak a programozást segítő funkciók, a szoftverek, a szenzortechnika, az eljárásváltozatok, a hegesztőgépek, és a hegesztési paraméterek monitorozása, a digitalizáció, más szóval az Ipar 4.0. A jövőbeli versenyképesség alapját ez a fejlesztési irány jelenti, a gyors vevői kiszolgálást, az átfutási és a gyártási idő minimalizálását.*

### Abstract

*Increasing market competition and customer demands play a major role in all manufacturing industries. For industrial companies, development and investment in automation is the only option that can offer a fast, dynamic and flexible solution to meet increased production demands. Automated welding is constantly evolving, with programming functions, softwares, sensor technology, process variations, welding machines and monitoring of welding parameters being developed as digitalisation, in other words Industry 4.0. This development direction is the basis for future competitiveness, fast customer service, minimisation of lead times and production times.*

## 1. Bevezetés

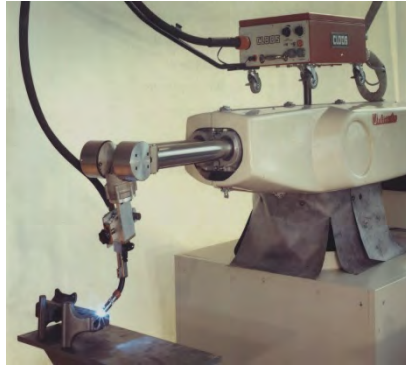
A termelékenység javítása érdekében ma a lehető legtöbb műveletet automatizálják, többek között a hegesztést is. Az automatizálás nemcsak a minőség állandóságának szempontjából fontos, hanem napjaink egyre nagyobb problémájában is segít, azaz a munkaerőhiány pótlásában. A nagyobb termelési sebesség, amit az automatizálás révén elérhetünk nem minden esetben elegendő, sokkal fontosabb a magas minőség és annak folyamatos fenntartása.

A gyártó cégeknél a termelésben ezek az eszközök, berendezések már nem számítanak újdonságnak. Bill Gates egy interjúban azt mondta: „Mindig túlbecsüljük a következő két évben bekövetkező változásokat és alábecsüljük a következő tíz év változásait.” A cikk keretében igyekszünk hasznos iránymutatást adni a jövő technikai megoldásainak alkalmazhatóságáról.

### 1.1 Robotok fejlődése

A robotok alkalmazása az iparban hosszú múltra tekint vissza. Valójában az ipari robotok történelmének gyökerei az '50-es évek Amerikájáig nyúlnak vissza. George Devol egy olyan eszközt készített el 1954-ben, amely képes volt különböző mozgásokat megjegyezni és leutánozni. 1956-ban George Devol és Joseph Engelberger megalapították az első robottechnikai vállalatot, az Unimationt. A prototípus végül 1958-ban készült el, és 1961-ben már meg is jelent az első kereskedelmi modell, amelyet már az Engelberger által alapított Unimation cég kezdett el forgalmazni.

Az 1970-es évektől azután egyre több ország lépett be az ipari robotok piacára, melynek következtében ezen a területen is fellendültek a különböző kutatás-fejlesztési projektek. A legtöbb korabeli robot, ekkor még csak balra / jobbra / fel / le mozgásra alkalmas forgó-és lineáris tengelyekkel rendelkező, továbbá ezek akkor még nagyon sok mindenben különböztek a ma megszokott változataiktól.



1. ábra

UNIMATE Építés éve 1976 Hidraulikus robot, Cloos hegesztéstechnikával

Az ezt követő évtizedekben a robotgyártók nagy hangsúlyt fektettek a fejlesztésekre. Az ipari robot univerzálisan alkalmazható, több mint 3 tengellyel rendelkezik, szabadon programozható és szenzoros irányítása is lehetséges.



2. ábra

ROMAT 55 típusú robotmechanika - 1981

A robotok használata az iparban egyre szélesebb körben válik elterjedtté. A becslések szerint világszerte több mint 80%-os növekedésre számíthatunk az elkövetkező években.

A hegesztési robotika területén is hasonló trendet figyelhetünk meg. Ázsia és a csendes-óceáni államok várhatóan a robohegesztés legnagyobb globális piacává válnak az elkövetkező években. A fejlődés élén Kína áll, amely a lehető legtöbb iparágban bevezeti a hegesztőrobotok használatát. India, Dél-Korea, Japán és Thaiföld szintén növekvő piacok a régióban. Folyamatos beruházásoknak, illetve az IPAR 4.0-nak köszönhetően, egyre több helyen merül fel a kérdése a folyamatoptimalizálás kérdése. Úgy gondoljuk, a termelékenység növelése és a hatékonysága szempontjából mindenképpen megéri egy robotra beruházni, holott elsősre nagyobb költségnek tűnhet, viszont jó kezekben gyorsan megtérülhet a befektetés.

## 1.2 Automatizálás, mint piaci versenyelőny

Először kezdjünk néhány ténnyel az automatizált hegesztés területéről. Az első dolog, amit fontos kiemelni, az az automatizált hegesztéssel elérhető állandó, reprodukálható varratminőség. Fejlett technológiák segítségével biztosítani tudjuk a kiemelkedően magas ismétlési pontosságot, vagyis minden hegesztési varrat hajszál pontosan ugyanazon a helyen, ugyanolyan sebességgel kerül megvalósításra, ezáltal garantálni tudjuk a gyártandó munkadarabok egységesen kiemelkedő minőségét. Robotrendszerünk segítségével lecsökkenthetjük a hegesztendő munkadarabok gyártási idejét, ami többek között annak köszönhető, hogy a munkadarabok, valamint a hegesztőpisztoly pozicionálását egymással párhuzamosan, egy időben végezzük. Ez azt jelenti, hogy mialatt a robot a megfelelő helyre mozgatja a hegesztőpisztolyt, a munkadarab pozicionáló elvégzi ugyanezt a precíz mozgást a befogott munkadarabbal. Mindebből az következik, hogy ily módon a komplex munkadarabok hegesztési ideje átlagosan mintegy harmadára csökkenthető.

A gyártás során alacsonyabb utómunkaigény jelentkezik, ami annak köszönhető, hogy mindig állandó hegesztési sebességgel, ívhosszal és szintén állandó gázterelő távolság mellett valósul meg a munkadarab hegesztése. Ezen túlmenően pedig, mivel hegesztési eljárásváltozatok széles skáláját tudjuk alkalmazni, ezekből kiválasztható az adott feladatra legalkalmasabb - a magas leolvadási teljesítményt nyújtó tandem hegesztéstől egészen a rövidíves hegesztést igénylő és alacsonyabb leolvadási teljesítménnyel járó kisebb lemeztávolságú anyagok hegesztéséig.

Fontos kihangsúlyozni, hogy a robotrendszerek segítségével kiemelten magas leolvadási teljesítmény érhető el. Kézi hegesztés során egy jól beállított hegesztőgéppel általánosságban 2-3 kg hozaganyagot lehet egy óra leforgása alatt leolvasztani. Ehhez képest egy automatizált folyamat során átlagosan már 5-6 kg-ról beszélünk óránként, de egy optimálisan beállított folyamat mellett akár a 8 kg-os leolvadási teljesítmény is elérhető. Ha pedig automatizált tandemhegesztésre kerül sor, ott ténylegesen megvalósítható a 18-25 kg/óra is. Ezt a mennyiséget egy kézi hegesztőnek a napi műszakja során nincs lehetősége elérni. Természetesen az adott feladat milyensége is befolyásolja ezeket az értékeket. Ha például a robottal vékony, 1 mm-es lemeztávolságot hegesztünk, akkor igazán jelentős különbségek is jelentkezhetnek. Összességében bár az aktuális feladaton is sok múlik, de általánosságban jól használhatjuk ezeket az értékeket.



3. ábra

Qirox robotrendszer

A következő fontos tény, hogy az automatizált folyamatok esetén a munkavállalók biztonsága is nagyobb. Ha különböző anyagpárosításokat hegesztünk, például horganyzott lemezt, vagy más olyan anyagokat, ahol mérgező gőzök is fejlődnek, például Cr-Ni acélok, a robotrendszert általában egy ernyővel fedett cella határolja, ami optimális esetben egy elszívó rendszerhez kapcsolódik. Ez az elszívó berendezés pedig megvédi a dolgozókat a mérgező anyagoktól. Jóllehet általában a hegesztő kollégák rendelkeznek saját védőfelszereléssel, ugyanakkor a csarnok területén tartózkodó kollégáik, például a targoncavezetők ugyanúgy ki vannak téve ezeknek a mérgező anyagoknak kézi hegesztés esetén. Ezért egy automatizált hegesztési folyamat minden dolgozó egészségére nézve nagyobb biztonságot jelent.

További előnyt jelent, hogy a különféle anyagkombinációk hegesztése sokkal egyszerűbbé válik. Úgy is fogalmazhatunk, hogy nem jelent többé problémát, ha például nagyszilárdságú finomszemcsés szerkezeti acélt kell hegesztenünk, ahol kiemeleten

fontos a lehűlési idő, illetve az előmelegítés betartása, valamint a vonalenergiát, illetve az összes hegesztési paramétert nagyon pontosan tudjuk szabályozni.

Ezzel áttekintettük az automatizált és a kézi hegesztés leglényegesebb különbségeit.

Automatizálás főbb okai:

- Minőségi, gazdasági okok
- Képzett kézi hegesztők hiánya
- Személyzeti és termelési költségmegtakarítás
- Drága hegesztőanyagok megtakarítása
- Munkahelyi biztonság, egészségügyi kockázatok csökkentése
- Új technológiák alkalmazása
- Termelékenység és rugalmasság
- Egyenletes minőség
- A feladat/folyamat ellenőrzése miatt szükséges
- Kiszámítható gyártási idők
- Az emberek mentesítése, nehéz, monoton / kellemetlen munka kiváltása

### 1.3 Jövőbe mutató fejlesztések

A robotok alkalmazása a hegesztés területén köznapivá, általánossá vált. A robotok fejlesztése két irányban folyik:

- A hegesztő robotok árának csökkentését célzó, nagy szérianagyságban előállítható, leegyszerűsített moduláris elven felépülő robotok fejlesztése.



4. ábra

Qirox kompakt cellák variánsai

- A megoldandó hegesztési feladathoz leginkább illeszkedő, a környezetéből információkat gyűjtő, azt feldolgozó és a szabályozásba beépítő, kvázi intelligens robotok kialakítása a külső szenzorok alkalmazása révén.

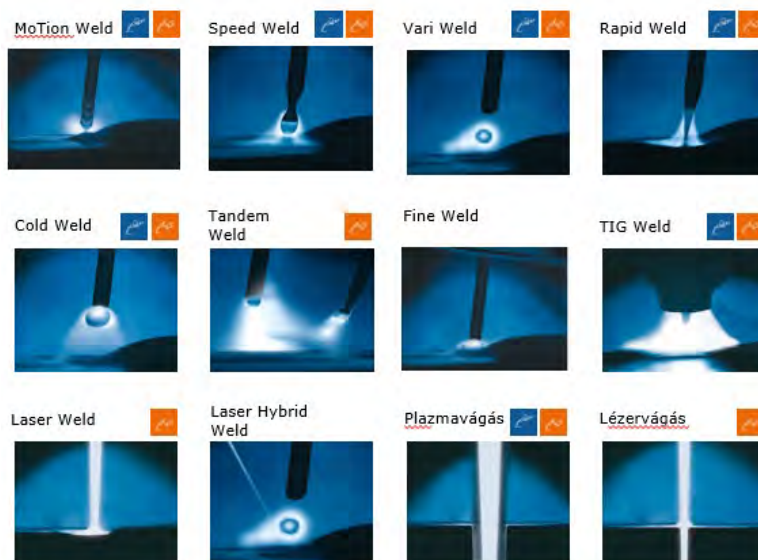


5. ábra

Qirox komplex, egyedi gyártósor

### 1.3.1 Modern hegesztőgépek, eljárásváltozatok sokszínűsége

Alapvető változást jelentett a hegesztő tápegységek fejlesztésében az IGBT tranzisztor, ezáltal a 20 kHz-vagy ezt meghaladó frekvenciájú impulzus és ennek révén az inverter technológia alkalmazása. Az inverteres tápegységek előnyei a kis tömeg és kis méret, jó hatásfok és teljesítménytényező, de legfőképp a minőségileg új szabályozhatóság lehetősége. Az inverteres tápegységek nyújtotta előny a berendezésekben a gyakorlatilag fokozatmentesen beállítható frekvenciájú impulzus áram. Az impulzus íves hegesztéssel megoldható az egy impulzus-egy csepp, vagyis a szabályozott cseppátmenet. A cseppátmenet ezáltal a cseppméret szabályozásával a védőgázos huzalelektrodás ívhegesztés alkalmazási köre lényegesen kiszélesedik, leküzdve a vékony falvastagság, a korlátozott hőkapacitás vagy a kényszerhelyzetű hegesztéskor a hegfürdő kezelhetősége okozta nehézségeket.



6. ábra

Cloos – eljárásváltozatok



Elsősorban az egyre szigorúbb előírások, jogszabályok és a folyamatosan emelkedő energia árak arra sarkallják a gépgyártókat, hogy fókuszpontba helyezzzék az energiahatékonyságot.

Az új típusú áramforrások esetében a kiemelkedő energiahatékonyságot annak köszönhetjük, hogy a piacon fellelhető legújabb / legfejlettebb elektronikai komponenseket válogatták össze, melynek köszönhetően akár 200 kHz-es impulzus frekvenciával tudnak működni a gépek, míg a régi berendezések 20 kHz környékén. A 200 kHz-es impulzus frekvencia egyébként nem minden esetben jelent előnyt, ugyanis a túl gyors szabályozás negatív hatással lehet az ív stabilitására, de úgy alakították ki a gépeket, hogy mindig az optimális értéken működjenek, ami sok esetben 40 kHz környékén van.

A megfelelő hegesztési eljárás kiválasztása rendkívül fontos a sikeres gyártás szempontjából. A gyártó vállalatok részére a kézi és automatizált hegesztési alkalmazásokhoz bevált és innovatív eljárások széles választékával jövőorientált megoldásokat kínálnak a kiváló minőség, a maximális gazdaságosság és termelékenység érdekében. Ennek következtében folyamatos fejlesztés alatt állnak a különböző hegesztési eljárásváltatok nemcsak labor, de gyakorlati körülmények között is.

### 1.3.2 Szenzorok fejlődése

Ma már általánosan elterjedtek az iparban a környezetéből információkat gyűjtő, azt feldolgozó és ez alapján a programjukat módosítani képes robotok. A hegesztő robotok mind szélesebb körű, gazdaságos alkalmazását teszik lehetővé a külső, opcionális szenzorok területén elért hardver és szoftver fejlesztési eredmények.

Egy hegesztőrobottal alapvetően előre leprogramozott hegesztési pályákat járunk be, miközben a hegesztőpisztolyt a varrat mentén vezetjük. Ennek következtében ugyanazzal a robotprogrammal sok munkadarab hegesztését tudjuk elvégezni. Fontos azonban kiemelni, hogy a valóságban az egyes munkadarabok fizikai kiterjedésében, tehát bizonyos méreteiben különféle eltérések jelentkezhetnek. Amennyiben ezeket az eltérő darabokat is egy korábban, másik munkadarabon létrehozott programmal hegesztenénk, könnyen megeshet, hogy a hegesztési varrat nem a megfelelő helyre fog kerülni. Ebből pedig az következik, hogy a varrat nem fogja teljesíteni azokat a követelményeket, amelyekre megtervezték.

Ez az a pont, amikor a szenzorok szóba kerülnek, ugyanis a segítségükkel a programkontúrok és a valódi munkadarabok közti eltérések kiegyenlíthetők. Az eltéréseknek több típusát különíthetjük el. Az első a munkadarabok tűrései, melyek az előgyártás során keletkeznek. Azután a szerszámok, illetve készülékek tűrésit is meg kell említenünk, illetőleg a behelyezés pontosságából kiadódó tűrésekről sem szabad elfeledkeznünk.



7. ábra

Szenzorok, alkalmazási területek

Beszélgünk most arról, hogy milyen további előnyei vannak a szenzorrendszereknek. Annak köszönhetően, hogy nem szükséges a robotprogramot utólagosan manuálisan korrigálni, jelentősen csökkenthető a munkadarab gyártási ideje. Ez abból is következik, hogy sokkal kevesebb utómunkára van szükség a hegesztést követően, ha összehasonlítjuk azzal, hogy mennyi pluszmunkával járna egy-egy tévesen lehegesztett varrat kijavitása. Mindezekon túl a kihozatal is magától értetődően növekszik, hiszen jóval csökken a selejtes munkadarabok mennyisége.

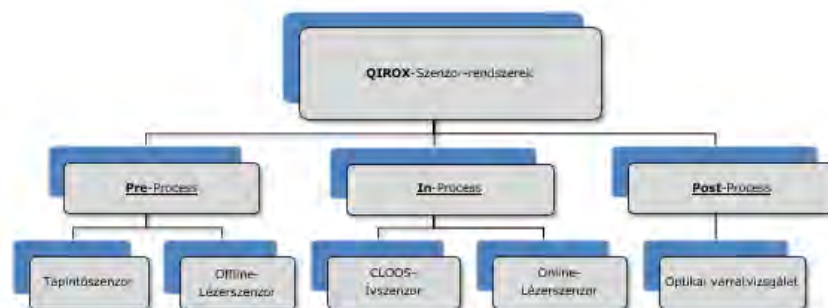
Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a szenzorrendszerek használatának legfőbb előnye abban áll, hogy használatuk segítségével növelhető a gyártmány minősége.

Alapvetően háromféle folyamatot különböztetünk meg. Az első az úgy nevezett pre-process, vagyis hegesztés előtti szakasz, mely során a munkadarabot offline tapogatjuk le, ami azt jelenti, hogy a hegesztési folyamatot megelőzően a rendszer egy mérést végez el. Ezt követően, az így kapott mérési adatokkal a robotprogram automatikusan korrigálásra kerül és a robot már a módosított program alapján végzi el a hegesztést.

A második folyamat az in-process, vagyis hegesztés közbeni szakasz, mely során a szenzor a hegesztési folyamat során online határozza meg a kontúrvonalakat és az esetleges eltéréseket direkt módon, közvetlenül korrigálja.

Végezetül, a harmadik folyamat az úgy nevezett post-process, hegesztést követő szakasz, mely alatt lényegében varratvizsgálatot értünk. Ez történhet mind offline, mind pedig online is. Ezen varratvizsgálat során a hegesztési varratok esetleges hibái után kutatunk.

Felmerülhet a kérdés, hogy mely tényezőkre kell odafigyelnünk, ha egy robotrendszerben szenzorokat szeretnénk alkalmazni. Először is bizonyos jellemzőket kell tekintetbe vennünk a megfelelő szenzor típus kiválasztása érdekében, ezek a hegesztési varrat alakja, a hegesztési eljárás fajtája, de maga a munkadarab anyagminősége is fontos szerepet játszik. Természetesen a munkadarab geometriáját is figyelembe kell venni, hogy a munkadarab kialakítása egyáltalán lehetővé teszi-e a szenzorok használatát. Végezetül pedig a gazdasági tényezőket is célszerű megvizsgálnunk, tehát azt, hogy megéri-e egy szenzorba beruháznunk.



8. ábra

QIROX szenzor-rendszerek

A következőkben tekintsük át, hogy milyen QIROX szenzorokról beszélhetünk és ezeket milyen esetekben alkalmazhatjuk. A pre-process során alkalmazhatjuk a tapintó szenzort, valamint az offline lézerszenzort. Az in-process során az ívszenzort, illetve az online lézerszenzorokat alkalmazhatjuk, végezetül pedig a post-process során az optikai varratvizsgálat jut jelentős szerephez. A munkadarab mérettűréseit, valamint a hegesztési hézagban és a varrat homlokl felületében, tehát a varratelőkészítés során keletkező eltéréseket is kezelni lehet. Így a varrat szélességváltozásain keresztül a varrat térfogata is meghatározható. Továbbá a hegesztés során fellépő hőhatások okozta deformáció is jól kezelhetővé válik szenzorok segítségével.



8. ábra

QIROX szenzorok

Ejtsünk néhány szót a szenzortechnika jövőjének vonatkozásában. Úgy véljük, hogy a szenzorokat a jövőben nem lehet megkerülni. A cél a munkadarabok gyártási költségének folyamatos csökkentése, ebből pedig az következik, hogy a gyártók igyekeznek költséget csökkenteni a robot elé helyezett előgyártott munkadarabokon. A minőség fenntartása érdekében elkerülhetetlen a szenzorok alkalmazása, melyek technológiája ezáltal folyamatosan fejlődik. A funkcionalitásuk bővül, a méretük pedig egyre kisebbé és kisebbé válik. Mindezekon túl pedig a felhasznált technológia gyökeresen meg fog változni. A hangsúly a hagyományos lézeres háromszögeléstől egyre inkább a kamerás képkiértékeléses technológia felé tolódik el.

### 1.3.3 A programozás jövőbe mutató fejlesztései

Meg kell említenünk a virtuális tér, tehát a munkadarab modellje és a valós munkadarab közötti eltéréseket.

#### 1.3.3.1 Az offline programozás folyamatos fejlődése

A Cloos RoboPlan elnevezésű szoftverével számítógép segítségével készíthetünk robotprogramot, melyet azután a robotvezérlésbe vihetünk át. Kezdjük is mindjárt a két szokásos programozási módszer összehasonlításával. Leggyakrabban a robotokat egy kézi programozó készülék segítségével tanítják be az adott hegesztési feladatra. Ezt nevezzük ONLINE módon történő betanításnak, a robottal ugyanis a hegesztési varratok megfelelő pontjaira állva és azokat elmentve, közvetlenül - lényegében a robotnak megtanítva - készítjük el a munkaprogramokat. Ebben az esetben a programozónak gyakorlatilag folyamatosan a robot mellett kell állnia, illetve a munkadarabot is előzőleg a megfelelő rögzítőkészülékben, illetve a forgatóban rögzíteni kell. Ez a betanítási folyamat hosszú órákat, bonyolultabb esetben akár napokat, heteket is igénybe vehet. Ez alatt az idő alatt a robottal nem lehet termelni. Továbbá az is körülményessé teszi a programozás folyamatát, hogy a betanítás során az egyes pontokat csak csökkentett sebességgel lehet felvenni a programozó és a robotmechanika védelmének érdekében.



9. ábra

RoboPlan offline programozás

Ezzel szemben az OFFLINE programozási módszer számos előnnyel rendelkezik. A program elkészítéséhez nem kell a robot mellett lennünk, hanem az irodában, vagy akár home office-ban is elkészíthetjük azt. Lényegében, amint rendelkezésünkre áll a munkadarab valósággal megegyező 3D modellje, elkezdhetjük a feladatot. Az offline programozás legnagyobb előnye, hogy gazdaságos, ugyanis a program elkészítésének ideje alatt a robotrendszert nem kell kivennünk a termelésből, ezáltal jelentős mennyiségű állásidőt takaríthatunk meg. Fontos megemlítenünk, hogy a CLOOS RoboPlan szoftver több olyan eszközt is tartalmaz, amelyek megkönnyítik, kényelmesebbé teszik a programozás folyamatát.

A programot egy számítógépen el tudjuk készíteni, nem szükséges hozzá, hogy a robot környezetében legyünk. Mindebből az is következik, hogy a programozó ez alatt az idő alatt sincs kitéve olyan káros hatásoknak, mint a gyártás közben fellépő zajok, a hegesztési füstök és az ívfény stb., ezáltal nyugodt és biztonságos körülmények között tud a munkájára koncentrálni.

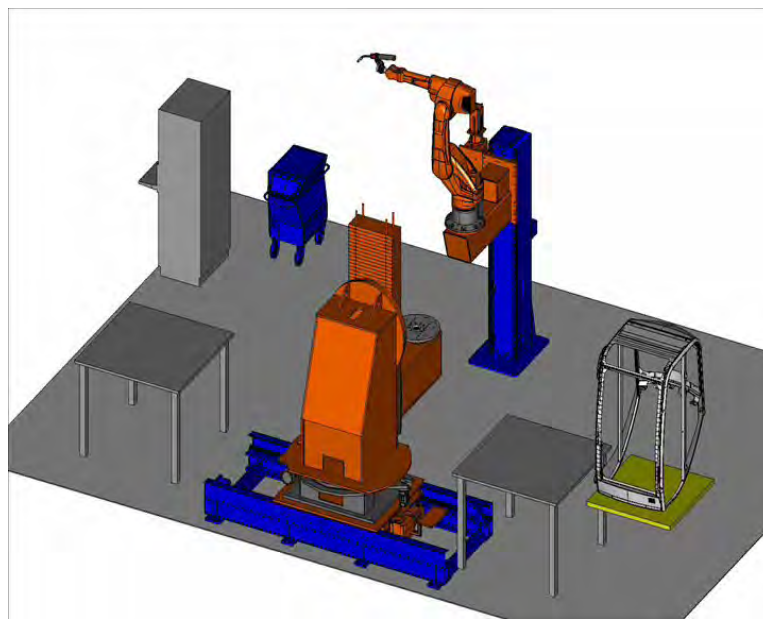
A szoftverben megtalálható a robotrendszer kalibrált, virtuális modellje. Ezen a virtuális roboton készítjük el a programot, amit azután feltölthetünk a valódi berendezésre. Fontos kiemelnünk, hogy a RoboPlan-ban lehetséges a hegesztési pálya automatikus generálása a munkadarab éleinek mentén. Egyszerűen csak ki kell jelölnünk az egyes éleket, a szoftver pedig automatikusan előállítja a hozzátartozó kódot, melyet természetesen igény szerint módosíthatunk.

Mindemellett lehetőség van a mellékmozgások automatikus generálására is. Itt azon robotmozgásokról beszélünk, melyek során a szerszámcsúcs (TCP) nem a munkadarab, ill. a varratok közvetlen közelében található, hanem a levegőben, pl. a parkpozícióból való ki-, vagy visszaállítás, illetve a munkadarab egymástól távolabb eső pontjai közötti váltás.

A RoboPlan rendelkezik egy könyvtárral, melyben a folyamat adatokat, pl. hegesztési paramétereket, vagy ha rendelkezünk speciális szenzorokkal, akkor az ezekhez kapcsolódó adatokat tárolhatjuk. Az offline programozás során hozzáférhetünk más programrészekhez, melyeket makróként is alkalmazhatunk egy-egy új program előállításakor.

A szoftveres szimuláció segítségével számos további adat könnyen kinyerhető. Ilyenek például a ciklusidők, a program futási ideje, hegesztési pálya hossza stb. Ezeket az adatokat pedig felhasználhatjuk a gyártási költségkalkulációkhoz. Mindezek alapján már eldönthető, hogy egy adott munkadarabon milyen mértékű költséghatékonyságot érhetünk el a robot alkalmazásával. A program futási idejének elemzésével pedig visszajelzést kaphatunk a rendszer kihasználtságának vonatkozásában. A szoftver segítségével lehetőségünk van ellenőrizni, hogy az egyes gyártandó munkadarabunk mennyire robot-barát kialakítású, tehát mennyire alkalmas a robottal történő hegesztésre. A szoftverben meg tudjuk vizsgálni a munkadarab hozzáférhetőségét, ami a munkadarabhoz tartozó rögzítőkészülék megtervezése során is nagy segítséget jelenthet.

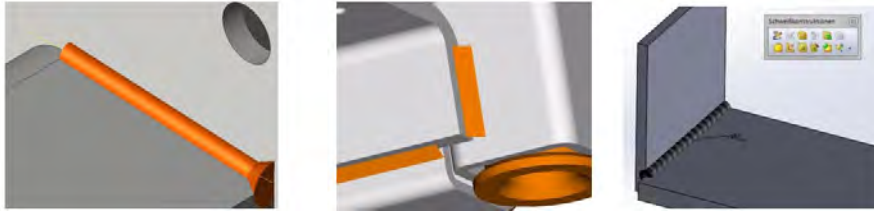
A RoboPlan használható komplett hegesztési szimulációra, illetve a robot mozgásainak megjelenítésére, beleértve a rendszer egyéb komponenseit, úgymint a külső tengelyek, vagy partner robotok. Lehetőségünk van ütközési teszt elvégzésére is, nemcsak a munkadarab és a hegesztőpisztoly esetében, hanem az összes komponens, mint pl. a robot egyéb részei és a teljes forgató vonatkozásában is. Így pontos információt kaphatunk arról, hogy mely területeken állhat fent ütközés veszélye.



10. ábra

RoboPlan modellezés

Hogy pontosan hogyan kerülnek a varratok az offline programozási rendszerbe, arra több lehetőség is kínálkozik. Ezek egyike, hogy rákattintunk a megfelelő élre a munkadarabon, melyet hegeszteni szeretnénk, illetve, ha az Eszközök menüben kiválasztjuk a Faces menüpontot a varratok kijelölésére. A következő lehetőség, ha bizonyos geometriai alakzatokkal, pl. egy síkkal vagy egy háromszög alapú hasákkal különböztettük meg a varratokat a munkadarab modelljén. Ilyenkor a RoboPlan ezeket képes beolvasni és varratként figyelembe venni. A harmadik lehetőség, hogy a tervező az általa készített 3D modellben elhelyezhet hegesztési varratokat, melyeket a RoboPlan szintén képes értelmezni.



11. ábra

RoboPlan – varrat létrehozása

A RoboPlan rendelkezik egy eszköztárral, mely lehetővé teszi a programozás felgyorsítását az automatikus hegesztési pályagenerálás segítségével. Amikor elkészítünk egy varratot, mindenekelőtt meg kell vizsgálnunk, hogy a robot képes-e elérni azt. Ezt a rendszer automatikusan elvégzi, majd szintén automatikusan legenerálja az úgy nevezett lead, vagyis vezér pontokat. A szoftver képes automatikusan hozzáadni egy plusz pontot a pályához annak érdekében, hogy minél tovább megtarthassa az optimális hegesztési pozíciót a sarok környezetében. Természetesen az egyenes varratok mellett ez az ívekre is alkalmazható. Tehát amennyiben a rendszer ütközést érzékel, abban az esetben automatikusan generál egy új, optimális ívet. Az offline programozási szoftverek fejlesztései azt a célt szolgálják, hogy a felhasználók igényeit kielégítsék és olyan funkciókkal szolgáljunk, mely a mindennapi programozást segítik, gyorsítják és hatékonyabbá teszik.

### 1.3.3.2 IRPS – a programozás jövője

A hegesztés robotizálható az egyedi gyártásban is. Az IRPS - Instant robotprogramozási rendszerrel. Kis gyártási mennyiségű munkadarabok hatékony hegesztése minimális programozási erőfeszítéssel megvalósítható. Különösen az acél- és fémszerkezetekben a kis darabszámú termékek automatizált hegesztésének programozási erőfeszítései, költségei gyakran aránytalanul nagyok. Az IRPS instant robotprogramozási rendszer segítségével rövid időn belül új programokat hozhatunk létre. Tehát akár az egy darabszámú munkadarabok automatizált hegesztése is kifizetődő lehet.

Az IRPS előnyeinek áttekintése:

Minimális programozási erőfeszítés

- Óriási időmegtakarítás
- A rendszer hatékonyságának növelése
- CAD munkahely nem szükséges

A munkadarab helyzetének és tűréseinek felismerése

- Kiváló hegesztési minőség
- Időmegtakarítás, mivel újra tanítás nem szükséges

Leszorító eszközök csökkentése/elhagyása

- A beruházási költségek csökkentése
- A nem produktív idők minimalizálása

Rövidítse le a tervezési időket

- Időben történő gyártás (just-in-time)
- Csökkent személyzet és anyagköltség
- Gyors szállítási határidők

Hogyan is működik:

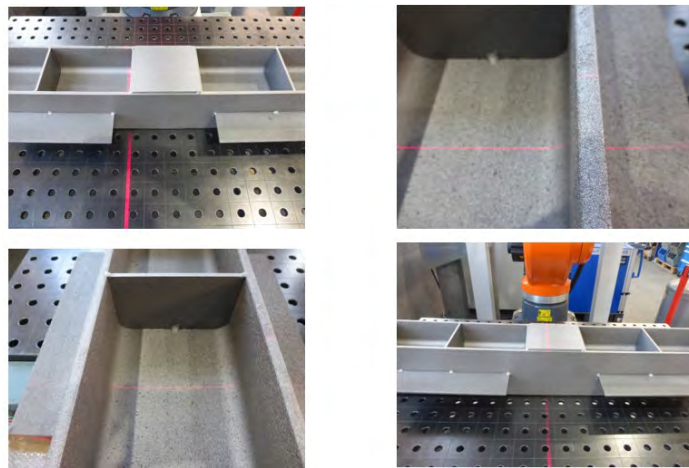
1. Pozícionálás: A kezelő szabadon helyezheti el az összeállított, fűzött munkadarabot a robot munkaállomásán.



12. ábra

IRPS – munkadarab pozicionálás

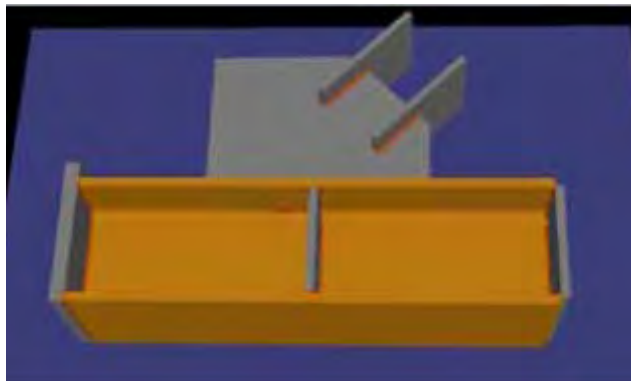
2. Letapogatás: A lineáris pályára szerelt szkener átvizsgálja a robotrendszer munkaterületét, és elmenti az eredményeket.



13. ábra

IRPS – lézeres letapogatás

3. Vizualizáció: Az IRPS 3D-s modellé konvertálja a mentett szkener adatokat. A 3D-s modell és az IRPS-ben mentett komponens geometria összehasonlításából a hegesztési program automatikusan generálódik. Ezután az IRPS továbbítja a robotvezérlőnek az automatikusan létrehozott programot, mely tartalmazza az összes hegesztési adatot.



14. ábra

IRPS – vizualizáció

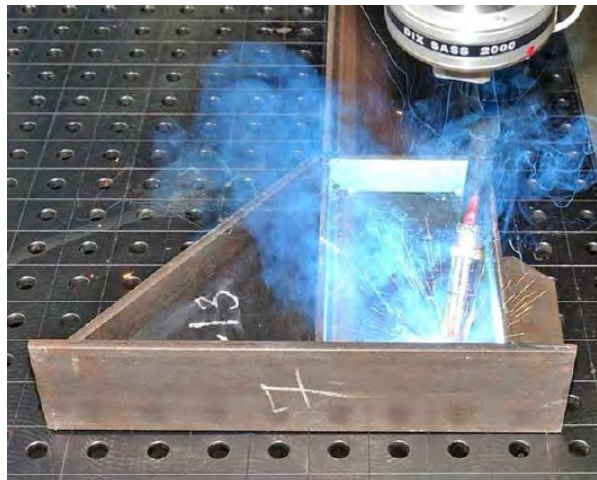
4. Ellenőrzés és módosítás: Az IRPS számos funkcióval rendelkezik, hogy a képernyőn egyszerűen és intuitív módon feldolgozhassa a munkadarab generált 3D adatait: Hegesztési varrathossz, hegesztési irány, hegesztési sorrend, a pisztoly szöge és távolsága a hegesztéshez, a hegesztési paraméterek változása, a tűzési pontok beállítása, 2D keresési rutinok beillesztése, útvonalak létrehozása a többrétegű hegesztéshez.



15. ábra

IRPS – ellenőrzés és módosítási lehetőségek

5. Hegesztés: A kezelő az IRPS képernyőn található gomb megnyomásával elindítja a hegesztési folyamatot.



16. ábra

IRPS – hegesztési folyamat elindítása

Természetesen az IRPS rendszernek is vannak korlátai. Jelenleg a rendszer csak 2D-s szkennelésre alkalmas, így a hegesztendő munkadarabok típusai is korlátozottak. Hegeszthető termékcsoportok az alábbiak: acélszerkezetek – I és H gerendák, létrák és korlátok - reprodukálható szerkezetek, hajógyártás és konténerépítés, rácsszerkezetek.



17. ábra

IRPS – hegeszthető termékcsoportok

### 1.3.4 Ipar 4.0

Az Ipar 4.0 fogalmát először 2011-ben használták a német ipar stratégiai megújulását célzó program megnevezésére. A középpontjában 9 új technológia (szimuláció, kiterjesztett valóság, autonóm robotok, vertikális/horizontális integráció, dolgok internete (Internet of Things – IoT), Felhő, Big Data, additív gyártás, kiberbiztonság) áll, amelyek forradalmi változást idéznek elő az iparban. Előfordulnak olyan megközelítések is, hogy a negyedik ipari forradalom valójában nem más, mint a harmadik ipari forradalom folytatása, annak kiteljesedése, mivel annak vívmányain (például számítógép, internet) és/vagy azok továbbfejlesztésén alapul. A robotok szintén a harmadik ipari forradalom korában jelentek meg. A most terjedő robotoknak viszont csak egy kis, de növekvő része „Ipar 4.0-generációs” robot. A nemzetközi és a hazai robotizáció folyamatában ma még döntően a hagyományos robotok vesznek részt. Az autonóm robotok – az Ipar 4.0, illetve a negyedik ipari forradalom robotjai – világviszonylatban is csak néhány százalékban fordulnak elő. Ezek a hagyományos robotoknál sokkal autonómabbak, rugalmasabbak és kooperatívabbak. Kommunikálnak, továbbá képesek biztonságosan egymással és az emberrel is együtt dolgozni. Az autonóm robotok legfőbb sajátossága, hogy a képességek sokkal nagyobb választékával rendelkeznek.

Az iparban a robotizáció előrehaladása, az automatizáció és a digitalizáció révén számottevően hozzájárul a termelés forradalmi átalakulásához, ami azután a gazdaságban és a társadalomban is hatalmas változásokat indukál.

A CLOOS C-Gate fejlesztése során különböző célkitűzések voltak szem előtt tartva annak érdekében, hogy egy olyan eszköz készülhessen el, melynek segítségével a gyártócégek nyomon követhetik és kiértékelhetik a Cloos gyártó berendezések, illetve hegesztőgépek működését. Fontos szempont volt, hogy a folyamatok digitalizálása és az adatok felhasználása által a gyártási hatékonyságot növelni lehessen. Tehát a későbbiek során a gyártó cégek még több és még magasabb minőségű terméket tudjanak legyártani.

Egy másik fontos cél, mely a fejlesztés során fontos szerepet játszott, a berendezések karbantartásával kapcsolatos. A tervezett, illetve megelőző karbantartás segítségével a hibák még bekövetkezésük előtt kiküszöbölhetők, ezáltal pedig az üzemzavarból származó állásidők minimálisra csökkenthetők.

A fejlesztés során természetesen nemcsak az említett célokat tartották szem előtt, hanem megvizsgálásra került az ügyfeleknél felmerülő fontos folyamatokat is. Az első ezek közül maga a gyártási folyamat, melynek keretein belül tudni akarjuk, hogy mi az, amire oda szeretnénk figyelni, vagy éppen mi a berendezéseink aktuális státusza.

Ezt követi a QM, vagyis a minőségirányítás folyamata, melyet a C-Gate QM modulja hivatott kezelni. Itt betekintést nyerünk magukba a gyártási folyamatokba, visszajelzést kaphatunk a munkadarabjaink gyártásáról, minőségellenőrzéséről.

A következő a karbantartás, ahol tudni szeretnénk, hogy melyek az éppen aktuálisan elvégzendő karbantartási folyamatok, szükség van-e cserealkatrészek beszerzésére.



Végül pedig nagyon fontos központi téma a különféle interfészek, melyeken keresztül a C-Gate elérhetővé és más vállalati rendszerekkel összekapcsolhatóvá válik. A C-Gate rendelkezik egy webes, böngészőn keresztül elérhető felülettel, illetve REST és UPC UA interfészekkel is.

## 2. Összefoglaló

A rendelkezésre álló hegesztési eljárásváltozatok száma folyamatosan növekszik, a megfelelő hegesztési eljárás kiválasztása egyre bonyolultabbá válik.

A robotok és az automatizálás nagyban segítenek a termelés minőségének és gazdaságosságának javításában. Pontosabb, megbízhatóbb folyamatok érhetőek el, maximális termelékenység és teljesítmény, nagyobb biztonság, csökkentett közvetlen munkaerőköltségek. Folyamatok felügyelhetők online vagy távoli munkahelyről.

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 igazából gépesítve lehet hegeszteni. Az új technológiák új lehetőségeket nyitnak meg a termelékenység és a nyereségesség terén. A nagy lehetőség az, hogy a robotok és az emberek együtt dolgozzanak. Az ember – robot együttműködés esetében megemlíthetjük a Kobot rendszereket is, melyek optimális belépést jelentenek az automatizált hegesztés világába. A kulcsrakész, azonnal munkára fogható Kobotok nem igényelnek sok helyet. Könnyen, gyorsan és rugalmasan integrálhatók a meglévő gyártási környezetbe.

A fentiekben említett fejlesztési irányok jelenthetik a jövőbeli versenyképesség alapját, a gyors vevői kiszolgálást, az átfutási és a gyártási idő minimalizálását. Az automatizálással járó előnyökkel, új technológiák alkalmazásával tudunk lépést tartani a megnövekedett vevői igényekkel.

## Irodalomjegyzék

- [1] Clive Gifford: Robotok című könyve
- [2] <https://www.robotvilag.hu/ipari-robotok-tortenelme>
- [3] Területi Statisztika c. folyóirat 61. évfolyam 5. számában megjelent, Kiss Éva – Tiner Tibor által írt, Robotizáció a negyedik ipari forradalom idején a világban és a magyar iparban, területi megközelítésben c. tanulmány”
- [4] Komócsin Mihály: A hegesztő eljárások fejlődése az közelmúltban, Miskolci Egyetem
- [5] Christian Paul: Wirtschaftliche Automatisierung durch Einsatz modernster Roboter- und Prozesstechnik in klein- und mittelständischen Unternehmen, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger
- [6] Jan Pitzer: Automatisierung als Wettbewerbsvorteil, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger
- [7] Lars Höfner: Beste Schweißnahtqualität mit den QIROX-Sensorsystemen, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger
- [8] Sven Müller: Offlineprogrammierung mit RoboPlan, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger
- [9] NAGY, J. (2019): Az ipar 4.0 fogalma és kritikus kérdései – vállalati interjúk alapján Vezetéstudomány 50 (1): 14–27.
- [10] RÜBMANN, M.–LORENZ, M. –GERBERT, P.–WALDNER, M.–JUSTUS, J.–ENGEL, P.– HARNISCH, M. (2015): Industry 4.0. The future of productivity and growth in manufacturing industries The Boston Consulting Group, Boston, MA.
- [11] Manuel Benner und Timo Steinbring: Digitalisierung in der Schweißtechnik, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger

# NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ELŐMELEGÍTÉSI HŐMÉRSÉKLETÉNEK ELLENŐRZÉSE

## PREHEATING TEMPERATURE TESTING ON HSS

Llana Mckanna  
doktorandusz  
Dunaújvárosi Egyetem  
[lamamkanna@gmail.com](mailto:lamamkanna@gmail.com)

Dr. Palotás Béla  
professzor emeritus  
Dunaújvárosi Egyetem  
[palotas.bela@uniduna.hu](mailto:palotas.bela@uniduna.hu)

*Abstract* The paper presents the preheating temperature testing on High Strength Steels (HSS), we checked five different preheating calculation methods; we calculated the preheating temperature for a steel which has 960 MPa Yield Point. We applied room temperature, 125, 175, 200, 225 and 275 °C preheating and welded a bead weld on centre of 10 mm plate which dimension was selected according to MSZ EN ISO 4063. GMAW process was applied in Ar 82% + CO<sub>2</sub> 18% shielding gas, with wire 1.0 mm diameter. On macrosection we checked the hardness distribution by ISO 9015 and found that the preheating 175 °C is enough for avoiding the hardness more than 350 Vickers. For calculation of preheating temperature seems more accurate the method which gives result near 175 °C. Unfortunately, we must take a conclusion that, different preheating temperature calculation methods give different preheating temperature for same base material. In the following steps, we would like to build up more accurate method which gives applicable preheating temperature for HSS.

Keywords: Preheating temperature, cold cracking, S960 QL

## 1. Introduction

Preheating is used in welding to assist maintain weld quality and prevent cracking and other issues that can lead to costly rework. Before welding steel or steel alloy pipes or plates that are 25.4mm thick or more, welding preheat is usually utilized. For oil and gas, transmission pipelines, power plants, structural construction, mining, shipbuilding, and heavy equipment applications, preheating is frequently required in shop and field welding. Preheating is the process of heating the area around the weld joint or the entire item to a certain temperature prior to welding. This slows the cooling of the weld and removes moisture, which helps avoid hydrogen accumulation which led to cracking. we calculated preheating temperature with some methods, and we should like to check their applicability. We used the methods for 960 MPa steel and different temperatures applied for preheating. We checked with hardness measuring method for testing of preheating. Which preheating gave hardness less than 380 HV, it is good preheating. The preheating calculation method is accurate which gives the applied temperature.

The type and thickness of the base material are among the parameters that determine whether a welding application requires preheat or not. The welding code is usually the deciding factor. The minimum and maximum preheat temperatures, as well as the required preheating duration, will be specified in the welding procedure specification (WPS) for the work to meet the code requirements. Before welding can begin, a part must often be held within a specified temperature range for a set amount of time — for example, between 121aC° to 200C° for 30 minutes. Welders must typically monitor the temperature of the base metal between weld passes to ensure that the material stays within the necessary range. Crayons, thermocouples, infrared thermometers, and thermal imaging cameras are all common temperature verification methods [1].

## 2. Cold cracking

HAZ cracking is defined by the separation of weld metal and parent metal just adjacent to the weld bead. Although the crack is caused by the welding process, it exists in the parent material. "Under bead cracking" or "Toe Cracking" refers to cracks that start below the surface, under or near a weld or HAZ. Because the cracking occurs after the steel has cooled below 316°C, it is known as "Cold Cracking," and because the cracking is linked to Hydrogen, it is known as "Hydrogen Induced Cold Cracking." These cracks most likely appeared after 48 hours of welding and are referred to as "Delayed cracking." Hydrogen-induced cracking occurs after weld cooling (thus the phrase "cold cracking") and is often delayed for several hours as atomic hydrogen

diffuses to high-tensile-stress locations. Hydrogen transforms to its molecule form at microstructural faults in a tensile stress field, causing cracking. Cracking in the HAZ or weld metal might be longitudinal or transverse Fig1.

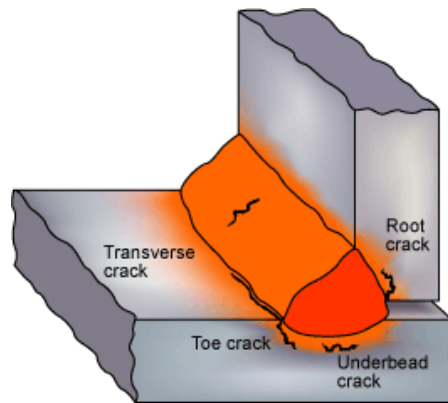


Fig. 1 Hydrogen cracks originating in the HAZ and weld metal.

In some cases, it may not appear for days. Most cold cracking begins in the base material (as opposed to the weld itself) and passes transversely into the weld. It is particularly common in thick materials, which are prone to rapid cooling due to the large heat sink, and results from induced residual stresses in the base material and the presence of diffusible hydrogen in the weld. Cold cracking can also occur in materials with high carbon or alloy content, as these are also higher in strength and can be less ductile [2].

There are three factors which combine to cause cracking:

1. hydrogen generated by the welding process.
2. a hard-brittle structure which is susceptible to cracking.
3. tensile stresses acting on the welded joint.

To prevent cold cracking, we want to do the following:

1. Preheat the base material to slow the cooling rate – this also diffuses hydrogen and will allow the weld bead and the base material to contract at a similar rate when cooling.
2. Run higher heat input procedures if preheating is not an option.
3. Select low hydrogen filler metals (typically have the designation H2, H4 or H8).
4. Do post weld heat treatment (hydrogen bake off).
5. Reduce the cooling rate by using heat blankets [3] [4].

### 3. Methods and results

I calculated preheating temperature with some methods, and we should like to check their applicability. We used the methods for 960 MPa steel and different temperatures applied for preheating. We checked with hardness measuring method for testing of preheating. Which preheating gave hardness less than 380 HV, it is good preheating. The preheating calculation method is accurate which gives the applied temperature.

#### 3.1. Preparation of the samples

I have got six samples from S960 QL, were prepared for the welding process with thickness 10 mm, with chemical composition shown in the following Table1.

Table1. Chemical composition in the base metal

		Chemical compositions																
Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	EW (CEV)	C14	F05
S960QL	.16	.21	1.25	.01	.03	.20	.04	.609	.039	.002	.01	.051	.016	.001	.003	.54	.361	-

### 3.2. The preheating temperatures

The Table 2. shows the temperature values according to five different methods plus the room temperature that I applied to the samples before starting the welding. I used C++ to create the equations to have more accurate results, in the following the equations for each method.

1. Method by standard EN1011-2: The method includes the impact of chemical composition and thickness of the specimen, the impact of hydrogen HD diffused content and the impact of heat intake Q, welding on Tp. Tp heating temperature is calculated from the sum of the overheating temperatures because of the impact of the individual factors listed, table 2 [5]. Figure 2 shows the computer aid program for calculating the preheating more precisely.

Table 2 Calculation of preheating by vwe method

	Equations	Parameters
1	$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150$	CET – carbon equivalent
2	$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$ (%)	% - share of chemical elements
3	$T_{pd} = 160 \cdot \tanh(d/35) - 110$	d – thickness mm
4	$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0.35} - 100$	HD – contents of defunded hydrogen ml/100 gr
5	$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) Q - 53 \cdot CET + 32$	Q - amount of heat ounces KJ/mm
6	$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$	Tp – the preheating temperature

```

                -press 0 to exit
put a number between 1 and 2 to access your calculation method :1
*****METHOD BY STANDARD*****
*      cet=c+((mn+mo)/10)+((cr+cu)/10)+(ni/40)      *
*      Tpcet=(750*cet)-150                          *
*      Tpd=(160*tanh(d/35))-110                      *
*      Tphd=(62*HD)-100                              *
*      Tpq=((53*cet)-32)*q)-(53*cet)+32             *
*      Tp=Tpcet+Tpd+Tphd+Tpq                        *
*****
insert Hd = 5
insert Carbon C =0.16
insert Manganese Mn = 1.25
insert Molybdenum Mo =0.609
insert Chrome Cr =0.20
insert Copper =0.01
insert Nickel Ni =0.04
Insert diameter d =10
insert Q=0.5
cet=0.367900
Tpcet=125.925011
Tpd=-65.490318
Tphd=210.000000
Tpq=6.250649

```

Fig.2 c++ Porgramm for standard method

Required preheating is is 275 °C.

- Method Itto and Bessyo: Method IB takes into account the chemical composition of the specimen, the contents of the hydrogen difunded and the voltage size that act on the compound during its hardening, table3 [5]. Figuer 3, shows the program was used for this method.

Table 3 Preheating calculation by IB method

	Equations	Parameters
1	$T_p = 1440 P_w - 392$	$P_w$ – splash parameter
2	$P_w = PCM + H/60 + K/40 \cdot 104$	PCM – parameter related to the chemical composition of steel H - amount of diffused hydrogen ml/100gr K - stiffening intensity
3	$PCM = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + (Mo + V)/15 + 5 B$	% - share of chemical elements
4	$K = 1352 d - 14,75 d^2$	d – thickness in mm (in case of stronger stiffening)
5	$d/600$	(replaces the entire third member in the equation (2) in case of mild stiffness)

```

1- method by standard
2- method bohler-shweisstechnik
3-method Ho and Bess
-press 0 to exit
put a number between 1 and 2 to access your calculation method :3
*****METHOD Ho AND BESS*****
* Pcm=C+(Si/30)+((Mn+Cu+Cr)/20)+(Ni/60)+((Mo+V)/15)+(5*B) *
* k=(1352*d)-(14,75*d^2) *
* Pw=Pcm+(H/60)+(k/40)*(10^4) *
* Tp=(1440*Pw)-392 *
*****
insert H=5
insert Carbon C =0.16
insert Manganese Mn = 1.25
insert Molybdenum Mo =0.609
insert Chrome Cr =0.20
insert Copper =0.01
insert Nickel Ni =0.04
insert Silicon Si =0.21
insert Vanadium V =0.39
insert diameter d=10
insert B=0.001
Pcm=0.312267
k=6020.000000
Pw=1505000.375000

```

Fig3. c++ Pogram for IB method

Required preheating is 225 °C.

- Bohler-Schweisstechnik method: The method described here was mainly developed for welding hot-solid steels, in particular for welding lame-martensitic medium alloy steels  
When using the Böhler method, the preheating temperature is determined taking into account the carbon equivalent (CE) and the sheet thickness. The carbon equivalent can be calculated in the following relationship:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni+Si}{15} \quad [\%] \quad (1)$$

In the light of the calculated carbon equivalent and the thickness of the sheet, the preheating temperature shall be as set out in Fig 4 [6]. Figure 5 shows the program was used to calculate the carbon equivalent and after I used the diagram to know the temperature.

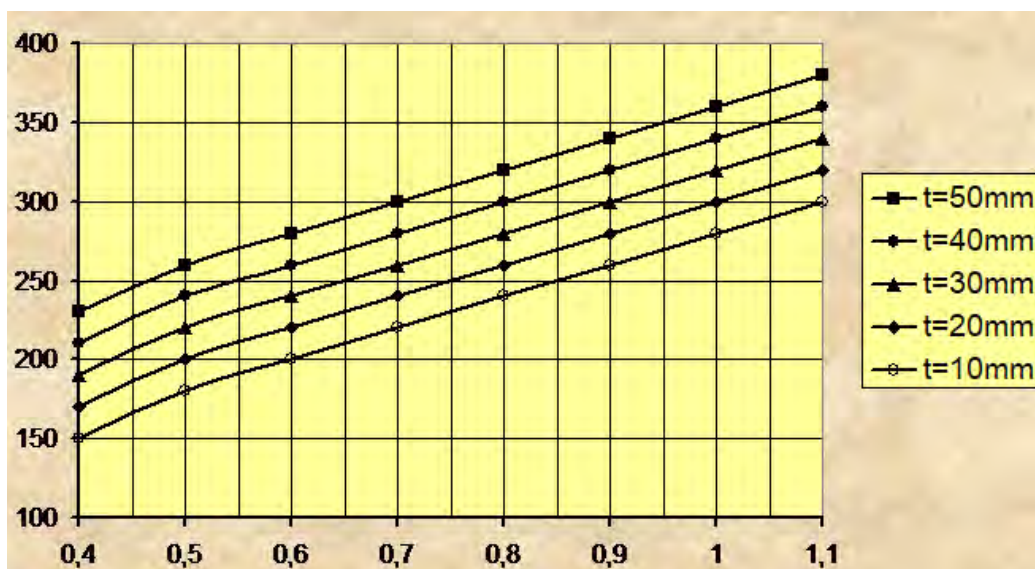


Fig 4. Preheating temperature as a function of carbon equivalency (CE) and sheet thickness (t) where the X axis refers to the carbon equivalent and the Y axis refers to the Tp

The array of functions shown in the figure is within the given range, i.e. t = 10... 50 mm, respectively CE = 0.4... 1.1, approximated by the following equation.

$$T_e = 280,21 \cdot CE^{0,6675} + 2 \cdot (t - 10) \quad [ \text{°C} ] \quad (2)$$

```

put a number between 1 and 2 to access your calculation method :0
*****BOHLER-SCHEISSTECHNIK METHOD*****
*
*      ce=c+(mn/6)+((cr+v)/5)+(mo/4)+((ni+si)/15)      *
*****
insert Carbon C =0.16
insert Manganese Mn = 1.25
insert Molybdenum Mo =0.609
insert Chrome Cr =0.20
insert Vanadium V =0.39
insert Nickel Ni =0.04
insert Silicon Si =0.21
Ce=0.655250

```

Fig 5 c++ program for calculating the carbon equivalent

Required preheating is 200 °C.

- German method: The pair of authors developed a method for determining the preheating temperature, which, in addition to the effect of alloying elements on cold cracking, takes into account the effects of plate thickness, diffusion hydrogen content and heat input. The combined effect of the aforementioned factors is expressed in the following context: [7]

$$C_{eIIW} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 = 0.16 + 1,25/6 + (0.2 + 0,609 + 0.039)/5 + (0.04 + 0,01)/15 = 0.16 + 0.21 + 0.17 + 0.003 = 0.543 \% \quad (3)$$

Specific heat input:  $q/v = 1 \text{ KJ/mm}$

Equivalent thickness:  $t = t_1 + t_2 = 10 + 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$

Required preheating is 125 °C.

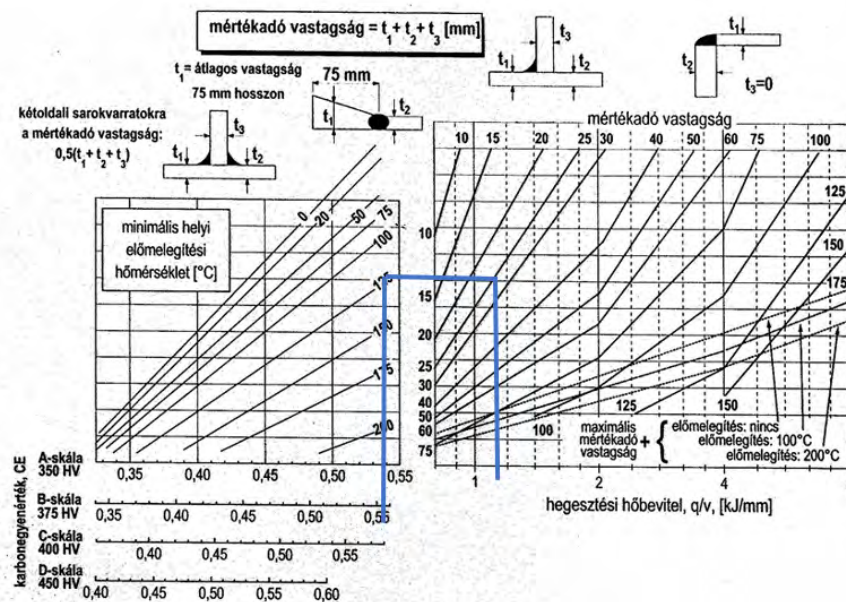


Fig 6. German method diagrams

- Thermophysical based method  $\Delta t_{8/5}$ : The method includes the impact of chemical composition and thickness of the specimen, the impact of hydrogen HD diffused content and the impact of heat input Q, the carbon equivalent is the main parameter for this method of calculating.  $\Delta t_{8/5} = 8 - 10 \text{ s}$  [7].

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr+V+Mo)/5 + (Cu+Ni)/15 \quad (4)$$

$$\text{For 3D: } \Delta t_{T_1-T_2} = \frac{(q/v)_{eff}}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{T_2-T_0} - \frac{1}{T_1-T_0} \right) \quad (5)$$

$$\text{For 2D: } \Delta t_{T_1-T_2} = \frac{(q/v)_{eff}^2}{4\pi\lambda\rho c s^2} \left( \frac{1}{(T_2-T_0)^2} - \frac{1}{(T_1-T_0)^2} \right) \quad (6)$$

where  $T_0$  : The preheating temperature [°C].

From equations we can calculate  $(q/v)_{eff}$  specific heat input (KJ/mm)

For 3D:

$$q/v = \Delta t_{8/5} 2 \pi \lambda (1/500-T_0 - 1/850-T_0)^{-1} \quad (7)$$

We can calculate the  $T_0$  as well if we know  $q/v$  and  $t_{8/5}$ .

For 2D:

$$\frac{q}{v} = \sqrt{\Delta t_{8/5} (4\pi\lambda\rho c) s^2 \left( \frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(850-T_0)^2} \right)^{-1}} \quad (8)$$

$s_{eqv} = 20$  mm, dot line shows 1.8 KJ/mm the required specific heat input without preheating. If we can only apply 1 KJ/mm (dot line) then preheating is 175 °C

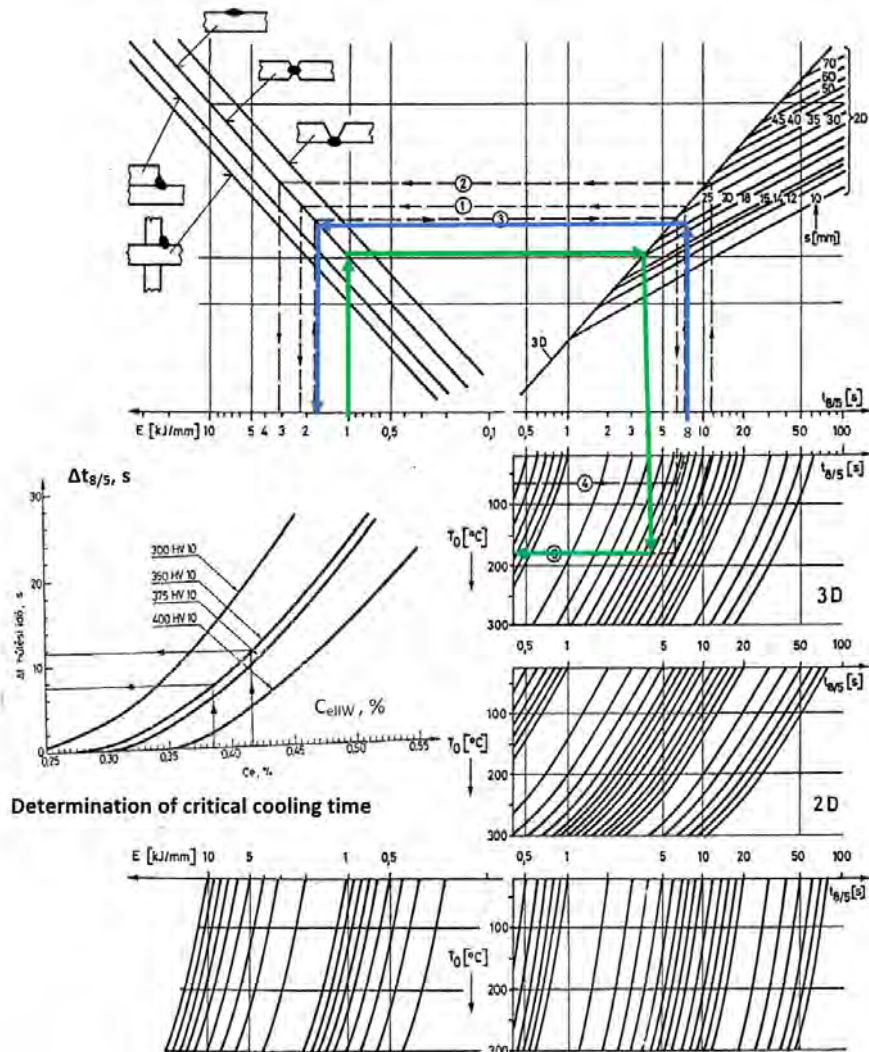


Fig 7.  $\Delta t_{8/5}$  method



Table 4. Preheating temperature values

Method	Preheating temperature, °C
1. Room temperature	20
2. Thermophysical based method $\Delta t$ 8/5	175
3. Bohler	200
4. IB	225
5. German	125
6. Standard	275

### 3.3 Preheating process and its measuring

The preheating process was applied in this experiment Open flame. Operators mix fuel gas with oxygen in a torch with a large heating tip, typically called a rosebud, and apply flame directly to the part. This process is often used for convenience; if operations already have a torch, additional equipment doesn't need to be purchased for preheating. I measured the preheating by using the thermometer.

Table5. Calculation of the travel speed and the heat input, where Q: the heat input for each sample

$T_p = 20^\circ\text{C}$ , $L = 70\text{mm}$ , $t = 21\text{sec}$ → $V = 3.33\text{mm/sec}$	→	$Q_1 = 1.05 \text{ KJ/mm}$
$T_p = 175^\circ\text{C}$ , $L = 70\text{mm}$ , $t = 25\text{sec}$ → $V = 2.8\text{mm/sec}$		$Q_2 = 1.26 \text{ KJ/mm}$
$T_p = 200^\circ\text{C}$ , $L = 70\text{mm}$ , $t = 19\text{sec}$ → $V = 3.68\text{mm/sec}$		$Q_3 = 0.96 \text{ KJ/mm}$
$T_p = 225^\circ\text{C}$ , $L = 70\text{mm}$ , $t = 20\text{sec}$ → $V = 3.5\text{mm/sec}$		$Q_4 = 1 \text{ KJ/mm}$
$T_p = 250^\circ\text{C}$ , $L = 70\text{mm}$ , $t = 19\text{sec}$ → $V = 3.68\text{mm/sec}$		$Q_5 = 0.9 \text{ KJ/mm}$
$T_p = 275^\circ\text{C}$ , $L = 70\text{mm}$ , $t = 22\text{sec}$ → $V = 3.18\text{mm/sec}$		$Q_6 = 1.1 \text{ KJ/mm}$

### 3.4 Welding process and welded joints

The welding process is MAG with parameters:

Current = 200 A

Voltage = 22 V

Wire electrode: Union X 96 and the classifications: EN ISO 16834-A, G 89 5 M21 Mn4Ni2. 5CrMo.



Fig 8. Welded joints

### 3.5 Preparation of test specimens

After the specimens were cooled, a cross-section of test piece was taken by mechanical cutting, the operation and the subsequent preparation of the surface were carried out carefully, so that the hardness of the surface to be tested is not affected metallurgically, (grinded, polished, and etched). It was prepared according to ISO 6507-1, (Fig 9).



Fig 9. Specimens after cutting and specimens embedded

### 3.6 Microscopic and macroscopic tests

The samples for microscopical examination were cut out to check the cross section and make sure if there is any defect, and from the photos I can say it was normal and the difference between the specimens was clear in the HAZ and the penetration was different as well depends on the temperature was applied. The macroscopic photos were taken by stereomicroscope with magnification 8x, and the microscopic photos were taken by the microscope device with different magnifications, but I chose the photos where I used the magnification 25x, Fig10.

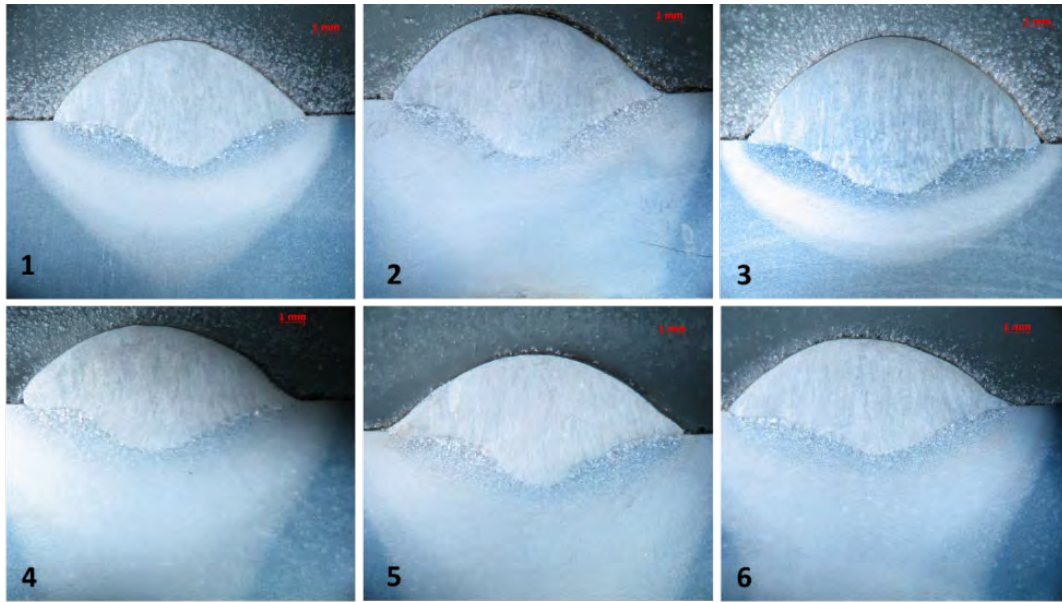


Fig 10. Macroscopic photos: 1.  $T_p=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2.  $T_p=175\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 3.  $T_p=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 4.  $T_p=225\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 5.  $T_p=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 6.  $T_p=275\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3.7. Hardness testing results

The hardness values were recorded in relation to the position of the indentation, the indentations positions were chosen according to ISO 9015-1. The HAZ ( heat affected zone) is the most important part of our investigating the table shows the values only in this part of the welded beads.( Table 6).

Table 6. The hardness results in the HAZ

HAZ1	514 Hv1	357Hv1	393Hv1	329Hv1	425 Hv1	350 Hv1
HAZ2	350Hv1	293 Hv1	329Hv1	290Hv1	304Hv1	288 Hv1
HAZ3	337 Hv1	304 Hv1	343 Hv1	339 Hv1	343 Hv1	362 Hv1
HAZ4	310Hv1	339 Hv1	357 Hv1	350 Hv1	355 Hv1	349 Hv1
HAZ5	299 Hv1	326 Hv1	307Hv1	310 Hv1	323 Hv1	299 Hv1
HAZ6	357 Hv1	296 Hv1	323 Hv1	365 Hv1	389 Hv1	335 Hv1

## 4. Conclusion and evaluation of results

To conclude the work, according to the results the most accurate preheating temperature is  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  which is sample number (2), because all the values were in the acceptance range, applicable method seems the (Thermophysical based method) for preheating temperature calculation. As many methods as there are results. A legitimate question is which method can be used for a given steel. We have verified the applicability of methods for determining preheating temperatures with experimental welds, in our experience the different methods are not generally applicable, they are valid only under certain conditions. It would be necessary to have a method that is well and generally applicable in practice, by which the work schedule for crack-free welding of edible steels could be determined.

## References

- [1] Lippold, John C. *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons, 2015. Boellinghaus,
- [2] Thomas, John C. Lippold, and Carl Edward Cross, eds. *Cracking phenomena in welds IV*. Springer International Publishing, 2016.

- [3] Singh, Raman, ed. *Weld cracking in ferrous alloys*. Elsevier, 2008.
- [4] Bailey, Norman, et al. *Welding steels without hydrogen cracking*. Woodhead Publishing, 1993.
- [5] Yurioka, Nobutaka, and Tadashi Kasuya. "A chart method to determine necessary preheat temperature in steel welding." *Quarterly Journal of The Japan Welding Society* 13.3 (1995): 347-357.
- [6] Jovičić, Radomir, et al. "Methods for calculating the preheat temperature welding the high strength steels." *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* 61.3 (2016): 113-119.
- [7] B. Palotas Béla: Modelling of welding thermal cycle by GLEEBLE 3800 physical simulator. scientific paper in Szechenyi university, (Gyor, 2. March 2017.) Printed in Hungary (2017), (Habilitation paper).

# MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS A HEGESZTETT SZERKEZETEK GYÁRTÁSÁBAN LEAN RENDSZER, HAT SZIGMA, 5S MÓDSZER, TOYOTA MÓDSZER

## QUALITY ASSURANCE IN THE FABRICATION OF WELDED STRUCTURES

**Nagy Ferenc**

REHM Hegesztéstechnika Kft, Tápiószele

nf@rehm.hu

*A minőségbiztosítás mára egy tudományággá fejlődött. Számos módszer, rendszer, szabvány és tananyag foglalkozik a kérdéssel. A mindennapi gyakorlatban mégis azt tapasztaljuk, hogy a minőség biztosításáról a termelésben résztvevő szakemberek, dolgozók, nagyon keveset tudnak. A kézi ívhegesztés minőségének biztosítása nagyban eltér más, géppel végzett munkák, gépészeti technológiák minőségének biztosításától. Az ívhegesztés minőségét alapvetően a minőségi munka feltételeinek biztosítása határozza meg. A hegesztőket ennek megfelelően képezzük, vizsgáztatjuk és folyamatosan ellenőrizzük azon képességüket, hogy megfelelő minőségű varratokat tudnak-e előállítani. Tehát a feltételeket biztosítjuk az emberi oldalról, mert mást nem tehetünk. Ezt követően bízunk abban, hogy sikerülni fog nekik. Ellenőrizzük is némileg a munkájukat különféle varratvizsgálatokkal, de leginkább bízunk abban, hogy a feltételek biztosításával biztosítottuk a minőséget is. Itt pedig következik egy óriási szakadék. A legtöbb esetben megfeledezzünk arról, hogy a hegesztő képességei, felkészültsége, ügyessége, gyakorlata nem elég. Számos további feltétele van a hegesztés minőségének, a megfelelő minőségű varratok elkészíthetőségének, amiket sorra biztosítanunk kell.*

*Quality assurance has now evolved into a discipline. A number of methods, systems, standards and curricula address this issue. In everyday practice, however, we find that the professionals and workers involved in production know very little about quality assurance. Ensuring the quality of manual arc welding is very different from ensuring the quality of other machine work and mechanical technologies. The quality of arc welding is basically determined by ensuring the conditions for quality work. Welders are trained accordingly, tested, and continuously assessed on their ability to produce welds of the right quality. So, we provide the conditions from the human side because there is nothing else we can do. After that, we hope they will succeed. We also check their work a bit with various weld tests, but we are mostly trust that we have also ensured the quality by providing the conditions. And here comes a huge gap. In most cases, we forget that the skills, competence, artfulness, and practice of a welder are not enough. There are several additional conditions for the quality of welding, the ability to make the right quality welds, which we need to ensure in turn.*

## 1. Bevezetés

A minőségbiztosítás mára egy tudományággá fejlődött. Számos módszer, rendszer, szabvány és tananyag foglalkozik azzal a kérdéssel, hogy hogyan előzhetjük meg a hibákat a gyártás során és érhetjük el a legjobb termelékenységi szinteket. A mindennapi gyakorlatban mégis azt tapasztaljuk, hogy a minőség biztosításáról a termelésben résztvevő szakemberek, dolgozók, nagyon keveset tudnak. Bonyolult, elvont tudománynak tartják, amit elméleti szakemberek művelnek, értelmetlen statisztikákat készítve és elemelve, amikkel csak megkeserítik a „normális” emberek, a „szakemberek” életét és több miatta a baj, mint amit ér. A Toyota, vagy a Lean rendszer, a Hat szigma, vagy az 5S módszer, mind olyan szavak, amiket azok, akik tanulták és tudják mit jelentenek, úgy emlegetnek, hogy a „hétköznapi” emberekkel éreztessék a „felsőbbrendűségüket”. Foglalkozhatnék most én is a különféle módszerek és elméletek ismertetésével, hogy úgy tűnjön, jómagam is a bölcsek és felsőbbrendűek, a titokzatos szavak ismerőinek kasztjához tartozok, azonban ennek senki sem venné hasznát.

A minőségirányítási módszerek tanulmányozása során arra jöttem rá, hogy maga a tudományos megfogalmazás és elnevezés teszi azokat misztikussá és a hétköznapi emberek számára – az ismeret hiánya miatt – viccek, gúnyolódások és már-már gyűlölet tárgyává, amikor a minőség valódi jobbítását célzó intézkedések helyét túlértékelt részletek misztifikálásává és értelmetlen szankciók eszközévé válik. Megkérdeztem egyszer egy kollégámat, hogy mi a véleménye az 5S módszerről. A válasz az volt, hogy az nálunk biztosan nem működne, mert igen bonyolult és csak multiknál, bürokratikus nagyvállalatoknál, autógyárakban alkalmazzák. Később, egy előadás alkalmával megkérdeztem a hallgatóságot arról, hogy mit tudnak az 5S módszerről. Mindenki tágra nyílt szemekkel hallgatott, míg végül egy ifjú hölgy megszólalt és azt mondta, hogy a rendről és a tisztaságról szól.

Nos, valóban: tegyél rendet magad körül, távolítsd el a munkakörnyezetedből azt, ami nem kell, ami pedig kell, azt helyezd el úgy, hogy minden kéznél legyen, takaríts ki a munkahelyeden, majd ezt a rendet és tisztaságot tartsd fenn a munkavégzésed során.

Ez lenne olyan bonyolult? Olyan titokzatos? Olyan kivitelezhetetlen?

A legtöbb feleség, anyuka, azt szeretné elérni, hogy a férje a garázsban, vagy a gyermeke a szobájában ezt valósítsa meg, mégsem nevezi 5S módszernek. Nagyon egyszerűen fogalmaz: „kisfiam, szedd össze és dobd ki a szemetet, a felesleges kacsákat, takaríts ki, rakj rendet, és végre ülj neki a házi feladatnak!”

## 2. Minőségbiztosítás

De térjünk csak vissza a hegesztett szerkezeteket gyártó társaságokhoz, ahol sokszor már közhelyként hangzik el az is, hogy „a minőséget nem lehet bele-ellenőrizni a termékbe, a minőséget bele kell abba gyártani”.

Hol siklik félre mégis olyan gyakran ez az egész?

Miért nem működik az igazi minőségbiztosítás a legtöbb helyen és miért maradunk meg a „jól bevált” MEO-nál, vagy egyszerűbben szólva, a minőség ellenőrzésénél?

Megtörténik a hegesztés, a MEO megvizsgálja, bejelöli a hibákat, amit kijavítunk, utána még ugyanezt egyszer-kétszer megismételjük és már kész is.

A vevő átveszi és kifizeti. Igaz, néha visszaküldi, de azt gyorsan, csendben kijavítjuk és mehet tovább.

Ezzel a folyamattal csak az a baj, hogy olyan, mint a klímaváltozás. Nem fáj, ha egy-két fokkal megnő az átlaghőmérséklet, de amikor már minden tavasszal elfagy a barack, nem esik eső három hónapig és az árak az egekbe kezdenek emelkedni, egyszer csak, hirtelen, elkezd nagyon fájni.

Napjainkban már el is értünk erre a pontra a hegesztett termékek gyártásában:

- Az energiaárak az egekben.
- Az alapanyag-árak az egekben.
- A hegesztőhuzal és a védőgáz ára a többszörösére emelkedett.
- A béreket emelni kell!
- Nincs hegesztő.
- Nincs a hegesztett szerkezeteket gyártani tudó és akaró szakember.

Baj van!

Én pedig a minőségbiztosításról filozofálok?!

Nos azért, mert – mint tudjuk– a minőségbiztosítási módszerek kidolgozói elsősorban a nyereségteremtést kívánták megvalósítani és maximalizálni. A minőségbiztosítás elsősorban a lehető leggazdaságosabban, legköltséghatékonyabban történő gyártás megvalósítási eszköze, ahol a minőség nem önmaga szépségeért valószínűleg meg, hanem a lehető legnagyobb haszonnal eladható, a vevő számára kívánatos és megfizethető termék előállításáért.

De térjünk csak vissza oda, ahol arról írtam, hogy a termelésben résztvevők keveset tudnak a minőségbiztosítás tudományáról!

Ennél sokkal nagyobb bajnak tartom azt, hogy akik tudják, miről szól a minőségbiztosítás, hogyan lehetne az elveket és módszereket működtetni, azok az elméleti szakemberek, vezetők, ritkán értenek a hegesztéshez, és nincsenek azzal tisztában, hogy magának a technológiai folyamatnak a minőségét hogyan lehetne biztosítani.

Így a hegesztett termékeket gyártó cégek nagyon nagy hányadában egy áthatolhatatlan „ködréteg” (nevezhetnénk akár hegesztési füstnek is) lebeg a hegesztőüzem dolgozói és a vezetés között, akik nem értik egymás nyelvét.

Az üzemi dolgozók azért szenvednek, mert a vezetők nem értik meg őket, a vezetők azért, mert a dolgozók nem akarják azt csinálni, amit elvárnak tőlük. Olyan ez, mint egy rossz házasság, ahol a pár nem érti egymást. A férj nem tudja, mi a jó a feleségének és fordítva. Mindkét fél a maga igazát hajtogatja és nem érti, miért nem működik.

Az ívhegesztett szerkezetek gyártása egy különösen „problémás” gyártási folyamat, mert maga a hegesztés eredetileg egy kézi munka, egy mikro-kohászati, mikro-öntészeti kézműves iparművészet. A kézi ívhegesztés minőségének biztosítása nagyban eltér más, géppel végzett munkák, gépészeti technológiák minőségének biztosításától. Éppen ezért mondhatjuk, hogy a hegesztés gépesítése, automatizálása, robotosítása, amit a technika fejlődése tett, és tesz egyre inkább lehetővé, egy kiemelt módszer a hegesztés minőségbiztosításának megvalósításában, ill. annak egyszerűbbé tételében, sőt önmagában is része annak. Ezalatt azonban már a minőség valódi, gyakorlati biztosítását értem, mert a bürokratizálódott minőségbiztosításnak teljesen mindegy, hogy minek a minőségét kell biztosítani, hiszen többnyire előírások, tanúsítványok és egyéb dokumentumok előállításából áll.

Az ívhegesztés minőségét a valóságban alapvetően a minőségi munka feltételeinek biztosítása határozza meg.

A hegesztőket ennek megfelelően képezzük, vizsgáztatjuk és folyamatosan ellenőrizzük azon képességüket, hogy megfelelő minőségű varratokat tudnak-e előállítani. Tehát a feltételeket biztosítjuk az emberi oldalról, mert mást nem tehetünk. Ezt követően bízunk abban, hogy sikerülni fog nekik. Ellenőrizzük is némileg a munkájukat különféle varratvizsgálatokkal, de leginkább bízunk abban, hogy a feltételek biztosításával biztosítottuk a minőséget is.

Itt pedig következik egy óriási szakadék. A legtöbb esetben megfélekedünk arról, hogy a hegesztő képességei, felkészültsége, ügyessége, gyakorlata nem elég. Számos további feltétele van a hegesztés minőségének, a megfelelő minőségű varratok elkészíthetőségének, amiket sorra biztosítani kellene, de ezek felett nagyon sok esetben átsiklunk, nem tartjuk őket fontosnak, vagy csak egyszerűen, akinek a feltételek biztosítása a hatalmában lenne, az nincs tisztában azok jelentőségével. Pusztán azért, mert nem ez a szakmája.

Egyszer egy idősebb kollégám azt mondta rám, az ügyvezetőre, hogy én egy cégen belüli szolgáltatás vagyok. Azt mondta, hogy nekem ügyvezetőként az a legfőbb feladat, hogy biztosítsam a beosztottaim számára a munkához szükséges feltételeket.

Lehet, hogy azt akarta velem megértetni, hogy próbáljam megtudni, neki milyen feltételekre van szüksége a munkájához? De vajon ő maga tisztában volt ezzel?

Most képzeljük el azt, hogy ez a tiszteletreméltó kollégám a gyár egyik hegesztője, én pedig a gyár ügyvezetője vagyok, és meg szeretném tőle tudni, mire van szüksége ahhoz, hogy a legjobban tudja végezni a munkáját:

Elkezdén sorolni és lassan rájönnek, hogy ő maga sem tudja, mert neki sem tanították meg az iskolában. Észrevenném, hogy csupa szép és jó dolgot javasol, de magamban azt kezdeném számolni, hogy a terméknek az árát ezek az intézkedések mennyivel növelnék, majd igyekeznék leállítani azzal, hogy jó-jó, megfontolom...

Szó volt már arról, hogy a gépesítés, automatizálás, robotosítás a hegesztés minőségének és termelékenységének a legkézenfekvőbb eszköze. Ezt az én dolgozómat viszont a termelékenység kérdése nem igazán érdekli, mert a nyereségből nem részesedik és a munkáját sem akarja elveszíteni, sőt egyáltalán nincs látása arról, hogy mi a gépesítés, robotosítás lényege, módja.

Megkérdeztem egyszer egy hegesztőt, hogy mi a véleménye arról, hogy robotra bízánk azt a munkát, amit éppen végez. Azt hittem, örülni fog, mert nem kell többet „robotolnia”.

A válasz nagyon érdekes volt: „én nem bírok a robotokban, inkább bírok a saját kezemben és egyébként is a robotok elveszik az ember munkáját.”

Igen? Az emberét, aki lassan nem lesz már, mert a hegesztő szakemberek száma egyre csökken?

Ennek a hegesztő szakembernek nem tanították meg, hogy a gépesített, robotosított hegesztéshez is kell hegesztő, mert azok maguktól nem tudják, hogyan kell hegeszteni. Az iskolákba sajnos nem azzal toborozzák a diákokat, hogy jöjjön robottal hegeszteni, mert az szép, korszerű, és nem az a szakma már, mint régen a hegesztőé volt.

Igen, tudjuk, hogy nem minden hegesztést lehet robotosítani, de jórészt pontosan a feltételek biztosításának hiányosságai okozzák ezt is.

Sajnos maguk a hegesztők sincsenek tisztában azzal, hogy az ő munkájuknak a minőségét és termelékenységét hogyan lehetne a leginkább fokozni. Az a vezető pedig, aki lépéseket tervez ezen a téren, az gyakran maguknak a hegesztőknek a makacs ellenállásába ütközik.

### 3. Összefoglalás

Összefoglalva az eddigi gondolataimat, a hegesztett szerkezetek gyártásának minőségbiztosítását célszerű egy képzési programmal kezdeni.

Elsőként a döntéshozó vezetők számára egy közérthető képzéssel a hegesztésről és annak minőségi, termelékenységi kérdéseiről.

Folytatásként az összes dolgozó számára, akik a termelésirányításban és a termelésben, valamint a minőségbiztosításban részt vesznek, ugyanebben a témában, de az egyes csoportoknak testreszabottan, a saját munkakörüknek megfelelően.

Végül maguknak a hegesztőknek, olyan ismeretmegújító hegesztéstechnikai képzést tartani, amelynek a középpontjában a minőség és a termelékenység áll. Az elméleti képzést követően a mindennapi hegesztési feladatainak megfelelő gyakorlati tréningeken megtanítani és begyakoroltatni a feladataik hatékony elvégzését.

Nagyon fontos, hogy ezek a képzések csak akkor érik el a kívánt célt, ha nem száraz, elavult elméleti ismeretek unalmas közléséből állnak, hanem gyakorlatorientált, közérthető ismereteket tartalmaznak, amelyek minden csoport számára a kívánt eredmények eléréséhez adnak kézzelfogható segítséget.

Mindenki számára világosan, érthetően és szemléletesen el kell magyarázni, meg kell tanítani, hogy a saját posztján mivel és hogyan tud hozzájárulni a hegesztett szerkezetek gyártásának minőségbiztosításához, ami egyben a hatékonyság, a nyereségesség és a versenyképesség alapja.

Ezt követően el kell indítani és megvalósítani azokat a gyártásfejlesztési programokat, amelyekkel egyenként lépésről-lépésre elérhető az ideális termelékenységi és versenyképességi állapot.

Egyes gyártásfejlesztési lépések nagyon egyszerűek, költségkímélők, de a hasznuk megkérdőjelezhetetlen. Mások ugyan jelentős beruházással járnak, de a hasznuk olyan egyértelmű, a megtérülésük olyan biztos, hogy nem szabad pályázatokra várni, mert az ilyen beruházások könnyen finanszírozhatók banki forrásból.

Az egyetlen, amire nagyon oda kell figyelni, hogy hozzáértő, megbízható gyártásfejlesztési partner álljon rendelkezésre, aki segít a szakszerű megvalósításban és az új eszközök, módszerek rendszerbe állításában.

A sorrendet viszont sohasem szabad felcserélni! Az elsőnek minden esetben a képzéseknek kell lenniük, különben a fejlesztések nagy eséllyel kudarcba fulladnak, vagy a kívánnál sokkal gyengébb eredményt hoznak.

**REHM**  
Hegesztéstechnika

- > Gyártásanalízis
- > Gyártásfejlesztési javaslatcsomag
- > Fejlesztések megvalósítása

**MINŐSÉG**  
↓  
**TERMELÉKENYSÉG**  
↓  
**VERSENYKÉPESSÉG**

Olvassa el a Kühne Zrt. robottechnikai beruházásának kapcsán a cég vezérigazgatójával készült interjút.

Tekintse meg videósajmlat, amelynek témája: A hegesztés gépesítése és robotizálása, mint a versenyképeség megtartásának egyetlen útja.

REHM Hegesztéstechnika Kft.  
• 3700 Tigrishegyi Árkádatyú C. 4.  
• Tel.: +36 (0)30 999 278  
• E-mail: [info@rehm.hu](mailto:info@rehm.hu)  
• Web: [www.rehm.hu](http://www.rehm.hu)

1. Előzetes konzultáció  
2. Gyártásmunkák  
3. Elemzés, megvalósítás  
4. A fejlesztési munka megvalósítása  
5. Megvalósítás kezdete

3 évtizedes gyártásfejlesztési tapasztalattal

30 ÉV TAPASZTALATTAL  
REHM

1. ábra  
REHM partner-program



# ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTÉSI TECHNOLÓGIA FEJLESZTÉSE ULTRA-NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKHOZ

## DEVELOPMENT OF RESISTANCE SPOT WELDING TECHNOLOGY ON ULTRA-HIGH STRENGTH STEEL SHEETS

**Sahm alden Abd al al**

Miskolci Egyetem,  
Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Egyetemváros  
sahm.alden@uni-miskolc.hu

**Ákos Meilinger**

Miskolci Egyetem,  
Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Egyetemváros  
metakos@uni-miskolc.hu

*Évtizedek óta az autógyártók arra törekednek, hogy növeljék az autókaros-széria szilárdságát úgy, hogy közben csökkenjen a jármű tömege, ezzel eleget téve a biztonsági és a környezetvédelmi céloknak is. Manapság az ultra-nagyszilárdságú acélok alkalmazásával ezek a követelmények egyre jobban teljesíthetők, viszont a gyárthatóságuk, így a hegeszthetőségük egyre nagyobb kihívást jelent. Ebben a cikkben DP600, DP1000, MS1200 és MS1400 minőségű lemezek ellenállás-ponthelesztésének különböző technológiáit mutatjuk be, valamint az ezekkel elért kötéstulajdonságokat.*

*For decades, automotive manufacturers have been seeking to increase the strength of the automotive body structure and reduce its weight for safety and environmental purposes. Nowadays, with the use of ultra-high-strength steels, these requirements can be better met, but their manufacturability, and thus their weldability, is an increasing challenge. In this paper we present different technologies of resistance spot welding of DP600, DP1000, MS1200 and MS1400 sheets and the properties of these joints will be presented too.*

### 1. Introduction

Research continues to develop the steel sheets in the automotive industry in order to reduce weight by increase the strength thus reducing the energy expended to eliminate CO<sub>2</sub> emissions and obtain excellent crashworthiness behavior [1]. Several joining methods other than RSW can be applied on the metal sheets such as the clinching joining technology applied on several types of metal sheets like DP600 [2]. Desirable properties in Advanced High Strength Steels (AHSS) are obtained from the multi microstructure and from the thermomechanical treatment process during manufacturing for this reason, it requires research on the weldability of AHSS [3][4]. The most common method of joining automotive body structures is Resistance Spot Welding (RSW), which is characterized by its efficiency, lower cost, high operation and productivity [5]. Therefore, it is self-evident to develop the RSW method and evaluate the weldability of the AHSS by having high quality of RSW to increase AHSS usage in the automotive industry. The difficulties that can face AHSS welding are hardly the same as the challenges facing welding of other steel grades such as High Strength Low Alloy steel (HSLA). The possibility of changes in the microstructure and mechanical properties may increase due to the presence of a higher percentage of carbon that may reach 0.3% in the chemical composition added to increase the strength of AHSS [6]. There are many types of AHSS that can be classified according to its microstructure and the mechanical properties as a result of different manufacturing treatment process. The most commonly used type in the automotive industry is Dual Phase Steel (DP), and Martensitic Steel (MS), these days has begun to increase mainly by using the RSW welding method [7]. Therefore, it is necessary to know the relevant variables, how they interact, and how to ensure the welding procedure to obtain acceptable similar and dissimilar weld joints of DP and MS that meet the design requirements. It is also necessary to know the mechanical properties of the RSW welded joints. These materials were developed based on manufacturing thermomechanical process and adding weldable alloys proportioned with carbon and other elements content. The recent literature review examines AHSS welding by RSW, however there was a shortcoming in comparing the microstructure and mechanical properties of different welded grades of AHSS steels. The objectives of this study are to compare the macrostructure and static mechanical properties by conducting shear-tensile, optical macroscopic and micro hardness tests of DP and MS dissimilar and similar RSW joints by applying different welding parameters to obtain the best result by optimization the welding parameters. Generally Dual Phase (DP) Steel consists of a ferrite matrix containing hard martensite, as ferrite gives the property of ductility. High specific strength and good initial work hardening rate besides the continuous yielding behavior and high ductility compared to steel of other grades, all these characteristics made DP steel widely used in the automotive industry. Ferrite-Martensite DP steel is produced during the

manufacturing processes by rapid cooling heat treatment from inter-critical region temperature directly to the room temperature [24]. Figure 1 shows the micro structure of martensite-ferrite DP steel.

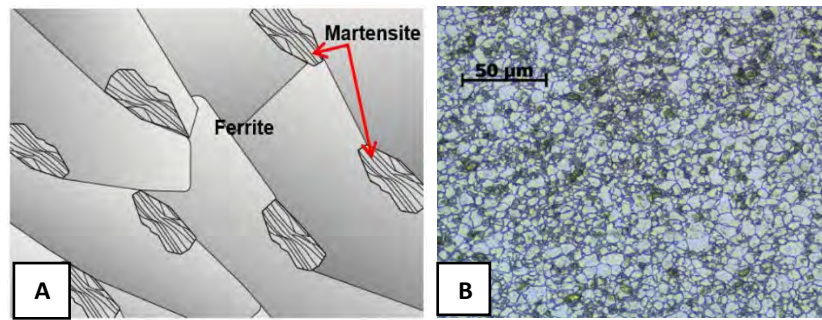


Figure 1.  
A: Schematic of a dual phase steel microstructure showing islands of martensite in a matrix of ferrite [22]; B: microstructure of Docol DP600 (dark: martensite / light: ferrite) [23].

In martensitic steels (MS), ferrite forms the minority, while martensite forms the majority in the ferrite matrix, it is transformed through quenching austinite phase, see Figure 2 MS is characterized by high strength up to 1700 MPa with relatively low elongation [8]. The applied post heat treatment process is to improve ductility where the additive elements such as manganese, silicon and boron in order to increase the hardness and improve other mechanical properties of the MS [9].

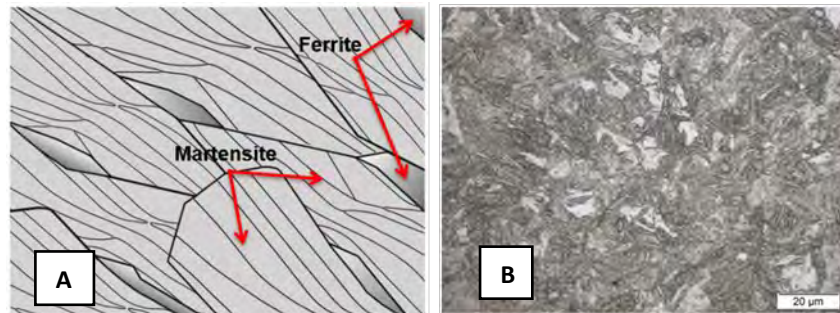


Figure 2.  
A: Schematic of a martensitic steel microstructure; B: microstructure of MS 950/1200 [10]

In general, there are three important factors for evaluating the quality of RSW, which are the weld-nugget size, weld mechanical performance and failure modes. shear-tensile test is very important for evaluating the mechanical properties of the spot weld. Characteristics of the Button Failure mode (BF), Interfacial Failure mode (IF) and Plug Failure mode (PF) are very important for the assessment of RSW welding quality. [11]. A study showed that the mechanical properties are lower in the shear-tensile test samples that failed in interfacial mode (IF). Changing the microstructure as a result of RSW in the Fusion Zone (FZ) and Heat Affected Zone (HAZ) plays an important role in changing the mechanical properties and may have a positive effect on the failure modes. A study monitored the softening in the heat affected zone (HAZ) resulting from RSW of different martensitic steel (MS) grades so due to allotriomorphic ferrite formation in the inter-critical HAZ (ICHAZ) and the tempering of martensite in sub-critical HAZ (SCHAHAZ) [12]. It was found that the softness in MS resistance spot welded joints may be used to improve some mechanical properties of spot weld joints used in the automotive industry due to its direct proportionality with elongation which leads to avoid the brittleness and to increase the ability of impact loads absorption. The absorption energy can be found by drawing the relationship between the displacement and the applied load in shear-tensile test as shown in Figures 6,7,8 and 9 in order to improve the ductility of the RSW joints and increase the ability to absorb applied stresses [11]. RSW technology is a process in which plain sheets interface are jointed together by the heat generated by resistance to the flow of electric current through plain sheets under force by electrodes [13]. Where the weld nugget is formed at the highest electrical resistance, which is between the metal sheets. This paper shows the effect of welding parameters of similar and dissimilar RSW samples. Interfacial failure (IF) is a critical problem in vehicle safety and Plug failure (PF), which occurs due to weld nugget take off from one of the metal sheets, gives an indicator of several important mechanical properties, such as the strain. Adjusting the welding parameters may work to obtain a required BF or PF mode result that suits the desired mechanical properties in the automotive industry, such as impact absorption and strain energy dissipation in crush cases. A study has shown that welding of AHSS by RSW has more ability to cause interfacial failure IF, this diversity in failures modes arises from transformation states resulting from RSW welding such as martensite transformation in the fusion zone (FZ), softening in HAZ

and segregation phenomena [14][15]. The transformation of IF and PF modes in AHSS RSW depends to a large extent on a complex relationship between weld geometry, fusion zone/HAZ/base metal properties, test geometry, and the stress state. Microstructural knowledge generated by AHSS RSW is very important to produce strong and reliable RSW weld joints as in the design requirements and can also predict the behavior of these welded spot joints when exposed to applied stresses [16]. Modification of RSW welding parameters such as current, cooling time and number of pulses is very important to improve the mechanical performance of welding spot joints to comply with the requirements of the design of the automotive industry. RSW experiment have been conducted on different steel grades with double pulse welding parameter, where better results appeared in the context of metallurgical weldability and an improvement in several important mechanical properties such as reducing the liquid metal embrittlement and increasing the shear-tensile strength. It was found that the second pulse reduces the partially melted zone and work as post weld heat treatment (PWHT) which leads to spot weld microstructural improvement [17].

## 2. Material and Method

Dual phase and martensitic steel as SSAB Docol (DP600, DP1000) and (MS1200, MS1400) with 1 mm thickness steel sheets were used as a base metal in our study of similar and dissimilar resistance spot welding joints with different base metal mechanical properties as shown in Table 2. Whereas, the similar samples were carried out of MS1200 and MS1400 steels, on the other hand, the dissimilar samples were carried out of DP600-MS1400 and DP1000-MS1200, Figure 3 shows the schematic drawing of RSW samples geometry which complies with shear-tensile test requirement.

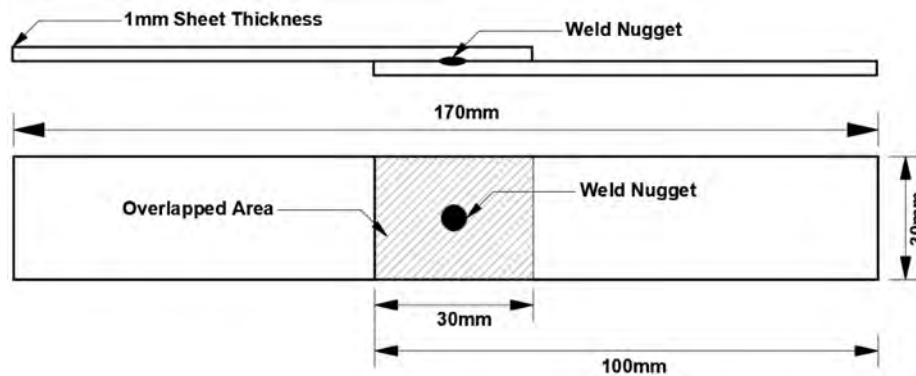


Figure 3.  
Schematic shear-tensile test samples

The mechanical properties and chemical composition are provided in Table 1 and 2 respectively based on the manufacturer material certificates. Regarding the hardness results was measured from our microhardness test (HV0.2) as show in Table 2. RSW was carried out using a TECNA 8007 spot and projection 50/60 Hz welders, 80 kVA single-phase AC press controlled by TE550 microprocessor-based welding control unit. Two opposite copper chromium zirconium electrodes with a 5 mm tip diameter moving perpendicular to the sheets by a pneumatic cylinder. Pressure turns into force as a result of pressure generated from the pneumatic system to the piston of a cylinder connected directly to the electrode [18]. An electric current of up to 36 kA passes in the electrodes through the clamped sheets by electrodes, which leads to joule heat as a result of the electrical resistance to the current flow at the faying surfaces of clamped sheets [11]. Similar and dissimilar samples were welded by RSW TECNA8007 welding machine with different welding parameters as shown in Tables 3, 4, 5 and 6.

Table 1. The chemical composition by maximum (wt. %) of the base metals

Grade	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	B
DP600	0.098	0.2	0.81	0.015	0.002	0.014	0.010	0.0002
DP1000	0.132	0.19	1.50	0.010	0.003	0.014	0.010	0.0002
MS1200	0.105	0.20	1.59	0.011	0.003	0.000	0.010	0.0022
MS1400	0.220	0.46	2.46	0.016	0.003	0.000	0.023	0.0000

Table 2. The mechanical properties of the base metals.

Grade	Yield strength $R_{p0.2}$ (MPa)	Tensile strength $R_m$ (MPa)	Elongation $A_{80}$ (min %)	(HV0.2)
DP600	448	669	18.7	204
DP1000	821	1074	9.5	329
MS1200	1108	1289	4.5	424
MS1400	1391	1496	4.5	460

## 2.1 Samples preparation

18-18 samples of similar and dissimilar joints were welded to be prepared for shear-tensile test as shown in Table 5 and 6 another 12 joints of each welding parameter were welded and prepared to optical macroscopic and microhardness tests as shown in Tables 3 and 4. The sample was cut in cross section that divides the weld nugget into two parts. The samples are placed in standing position inside crucibles, the direction of the cross-section of the weld nugget facing upwards. The crucibles are filled with acrylic resin for 24 hours curing to solidify. The grinding process is carried out with an abrasive paper of P120, P400, P1000 and P1500 grit grades respectively. The samples were polished with a rotary pad polisher using distilled water and high-performance diamond DP-Stick P materialographic-polishing material. The polished samples were etched by nitric acid and alcohol solution (Nital) in rate of 2.5 vol.% HNO<sub>3</sub>+ 97.5 vol.% ethanol respectively.

## 2.2 Macroscopic and microhardness tests

Etched samples were examined by optical macroscopic test conducted by Zeiss Stemi Stereo Microscope to identify the Heat affected zones HAZ and Base Metals BM. Inter-critical Heat Affected Zone ICHAZ, Sub-critical Heat Affected Zone SCHAZ, Upper-critical Heat Affected Zone UCHAZ and Base Metal BM as shown in Figure 4. Vickers hardness (HV 0.2) was conducted after macroscopic test by Mitutoyo micro hardness tester for six samples for each of MS1200 and MS1400 as shown in Tables 3 and 4, an average of 50 measurements of indentation were taken with a distance between measurements is 0.2 mm as shown in as shown in Figure 10.

Table 3. Dissimilar samples of Micro-Hardness and Optical Macroscopic tests

Grade	Sample No.	Current (I) kA	No. of Pulses	Electrode Force (kN)	Welding Time (Cycle)	Cooling Time (Cycle)
DP600-MS1400	OPM01	5.8	1	3	12	
MS600-MS1400	OPM02	6.4	2	3	6x2	15
MS600-MS1400	OPM03	8.5	1	4	16	
DP1000-MS1200	OPM04	5.8	1	3	12	
MS1000-MS1200	OPM05	6.4	2	3	6x2	15
MS1000-MS1200	OPM06	8.5	1	4	16	

Table 4. Similar samples of Micro-Hardness and Optical Macroscopic tests

Grade	Sample No.	Current (I) kA	No. of Pulses	Electrode Force (kN)	Welding Time (Cycle)	Cooling Time (Cycle)
MS1400	OPM07	5.8	1	3	12	
MS1400	OPM08	6.4	2	3	6x2	15
MS1400	OPM09	8.5	1	4	16	
MS1200	OPM10	5.8	1	3	12	
MS1200	OPM11	6.4	2	3	6x2	15
MS1200	OPM12	8.5	1	4	16	

\*1 cycle=20ms

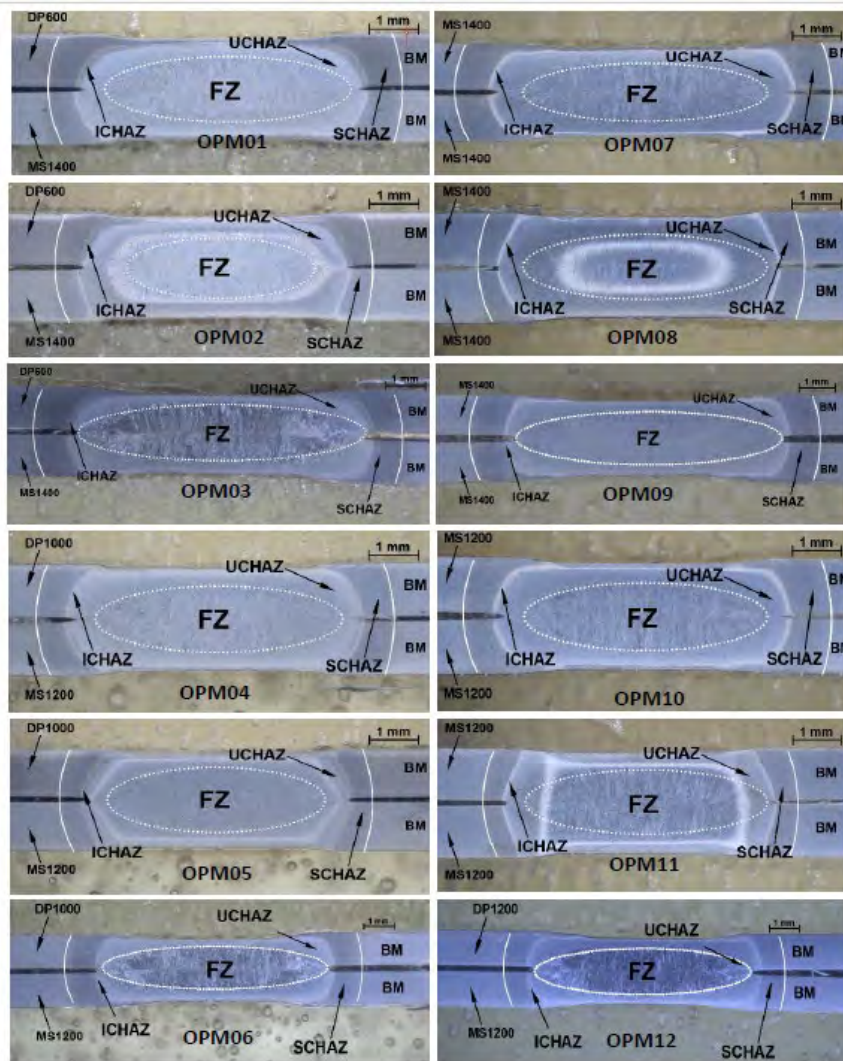


Figure 4.

Macrostructure photos for MS1200 in the left column and MS1400 in right column

### 2.3 Shear-Tensile test

The shear-tensile test was carried out on 18-18 similar and dissimilar RSW samples in total as shown in Tables 5 and 6. MTS 322 test frame machine was used with 0.2 mm/s loading speed, Figures 6,7,8 and 9 shows the relationship between displacement and the applied load. The displacement describes the ability to absorb energy, which is the ability of the weld to absorb energy before failure initiation.

Table 5. Shear-tensile test results

Grade	Sample Number	Current (I) kA	No. of Pulses	Electrode Force (kN)	Welding Time (Cycle)	Cooling Time (Cycle)	Peak Load (kN)	Displ. (mm)	Failure Mode
MS1200	S01	5.8	1	3	12		11.487	0.542	Interfacial
MS1200	S02	5.8	1	3	12		10.536	0.544	Interfacial
MS1200	S03	5.8	1	3	12		11.040	0.483	Interfacial
MS1200	S04	6.4	2	3	6x2	15	12.340	0.674	Interfacial
MS1200	S05	6.4	2	3	6x2	15	11.501	0.609	Interfacial
MS1200	S06	6.4	2	3	6x2	15	11.531	0.612	Interfacial
MS1200	S07	8.5	1	4	16		17.978	0.792	Button
MS1200	S08	8.5	1	4	16		18.136	0.899	Button
MS1200	S09	8.5	1	4	16		17.991	1.036	Plug
MS1400	S10	5.8	1	3	12		12.092	0.549	Interfacial
MS1400	S11	5.8	1	3	12		11.402	0.487	Interfacial
MS1400	S12	5.8	1	3	12		11.408	0.504	Interfacial
MS1400	S13	6.4	2	3	6x2	15	12.609	0.518	Plug
MS1400	S14	6.4	2	3	6x2	15	13.095	0.567	Plug
MS1400	S15	6.4	2	3	6x2	15	12.688	0.498	Plug
MS1400	S16	8.5	1	4	16		17.593	0.901	Button
MS1400	S17	8.5	1	4	16		17.308	0.641	Button
MS1400	S18	8.5	1	4	16		17.475	0.675	Button

Table 6. Shear-tensile test results of dissimilar samples

Grade	Sample Number	Current (I) kA	No. of Pulses	Electrode Force (kN)	Welding Time (Cycle)	Cooling Time (Cycle)	Peak Load (kN)	Displ. (mm)	Failure Mode
MS600-MS1400	D01	5.8	1	3	12		10.356	0.701	Interfacial
MS600-MS1400	D02	5.8	1	3	12		9.982	0.657	Interfacial
MS600-MS1400	D03	5.8	1	3	12		9.961	0.618	Button
MS600-MS1400	D04	6.4	2	3	6x2	15	9.631	0.647	Plug
MS600-MS1400	D05	6.4	2	3	6x2	15	9.707	0.729	Button
MS600-MS1400	D06	6.4	2	3	6x2	15	9.584	0.723	plug
MS600-MS1400	D07	8.5	1	4	16		13.281	1.159	Button
MS600-MS1400	D08	8.5	1	4	16		13.464	1.055	Button
MS600-MS1400	D09	8.5	1	4	16		13.538	1.264	Button
MS1000-MS1200	D10	5.8	1	3	12		10.851	0.504	Interfacial
MS1000-MS1200	D11	5.8	1	3	12		10.737	0.506	Interfacial
MS1000-MS1200	D12	5.8	1	3	12		10.701	0.501	Interfacial
MS1000-MS1200	D13	6.4	2	3	6x2	15	10.963	0.658	Plug
MS1000-MS1200	D14	6.4	2	3	6x2	15	10.872	0.664	Plug
MS1000-MS1200	D15	6.4	2	3	6x2	15	11.184	0.702	plug
MS1000-MS1200	D16	8.5	1	4	16		17.326	0.864	Button
MS1000-MS1200	D17	8.5	1	4	16		17.099	0.849	Button
MS1000-MS1200	D18	8.5	1	4	16		17.278	1.173	Button

\*1 cycle=20ms

### 3. Results and discussion

#### 3.1 Shear-tensile test

In similar samples, the shear-tensile test showed the highest value of peak load and displacement for the samples welded with current 8.5 kA. samples S09 and S16 respectively. The failure modes varied between Button (BF) and plug (PF) failures as a result of the softening, where the highest value of softening was in samples welded with current 8.5 kA. In the dissimilar samples, the same scenario was repeated in terms of tensile shear strength and the displacement in samples D09 and D16. Regarding the failure modes, all the samples that were welded with 6.4 and 8.5 kA current showed a diversity in the failure modes between (BF) and (PF). Figures 6,7,8 and 9 shows the displacement of the samples of similar and dissimilar samples according to the welding parameters shown in Tables 5 and 6. The absorbed energy which is the ability of the weld to absorb energy before failure start give an indication about displacement phenomena. The increase in current has a great effect on increasing the amount of heat input, which means a greater effect on the microstructure recrystallisation. During of shear-tensile test the stresses are generated in the vicinity of the weld nugget as shown in Figure 5.

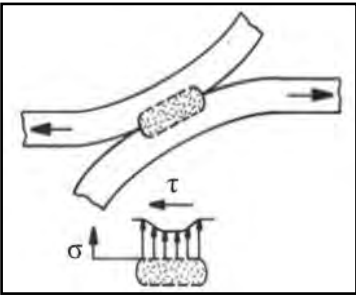


Figure 5

Schematic of weld nugget shear-tensile test stresses distribution

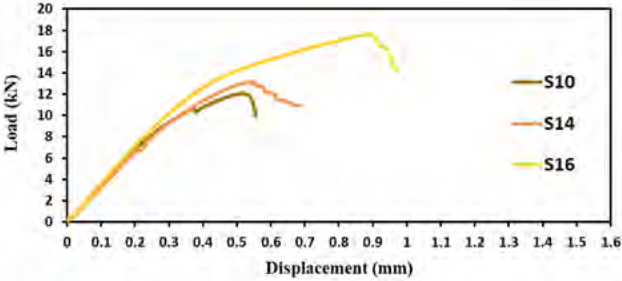


Figure 6.

Load-displacement of the RSW of similar MS1200 steel joints

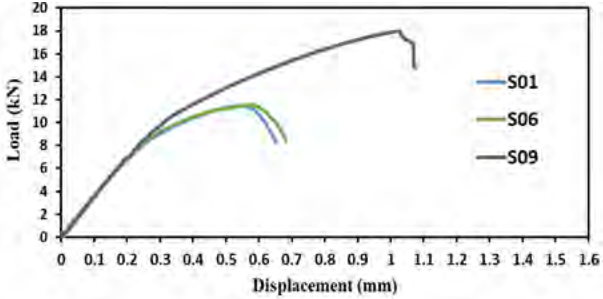


Figure 7.

Load-displacement of the RSW of similar MS1400 steel joints

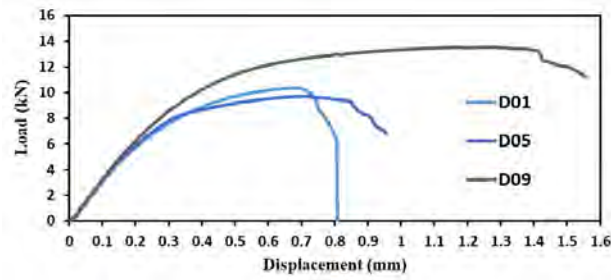


Figure 8.

Load-displacement of the RSW of dissimilar DP600-MS1400 steel joints

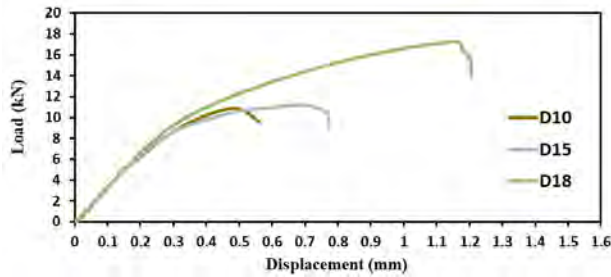


Figure 9.

Load-displacement of the RSW of dissimilar DP1000-MS1200 steel joints

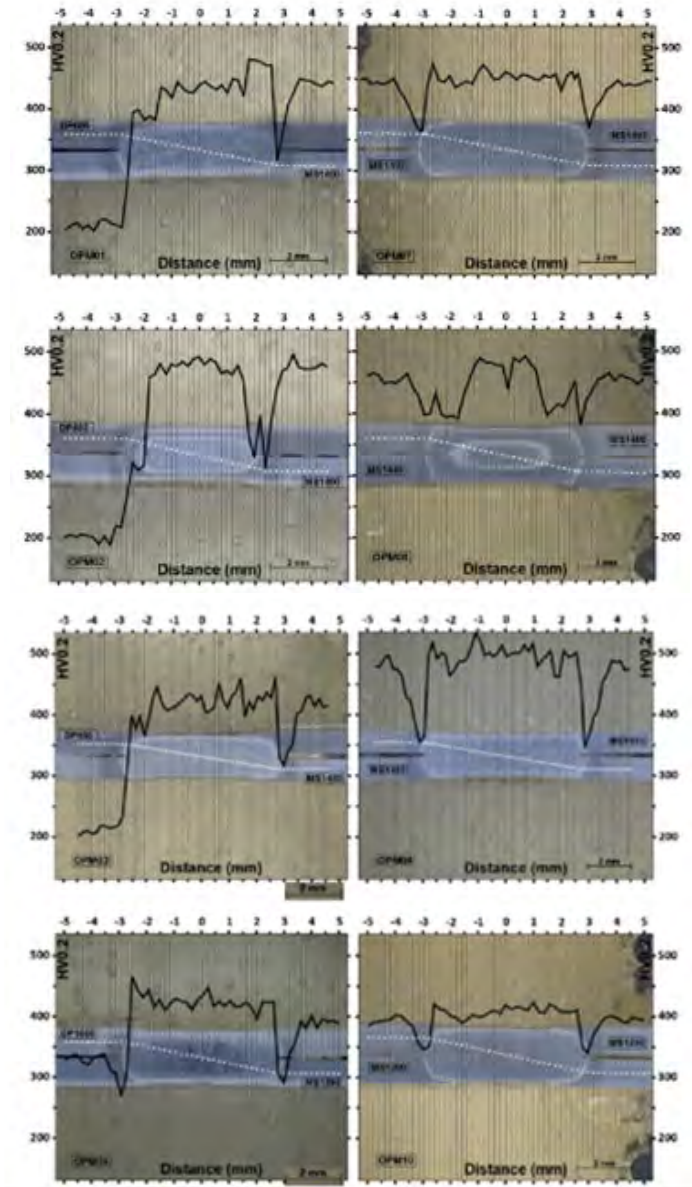
### 3.2 Macrostructural and Microhardness evaluation

In the dissimilar DP600-MS1400 samples, a steep gradual increase in hardness was observed in the ICHAZ and UCHAZ of DP600 steel in all welding parameters. The hardness reached its peak in the fusion zone of DP600 and MS1400 RSW. The rapid increase in hardness is explained by the heat in ICHAZ reaching  $A_{c3}$  temperature, which leads ferrite transform into austenite, and thus to martensite as a result of rapid cooling. The fraction of martensite increases with approach towards the fusion zone. This explains the rapid increase in hardness at DP600 side of the weld nugget [25]. A difference in hardness measurements was observed at MS1400 between single pulse and double pulses parameters. In single pulse parameter the softness was observed at MS1400 SCHAZ, while in the double pulses two softening points were observed in the fusion border and in ICHAZ of MS1400. There was an increase in the hardness located in UCHAZ between the two softening points, and it is a small increase compared to the hardness origin of the MS1400 base metal. The dissimilar DP1000-MS1200 samples with its different RSW parameters have the same softening and hardness increase pattern. Softness points was observed in the ICHAZ and SCHAZ at DP1000 and MS1200 while the increase in the hardness was observed at the fusion zone. The increase in hardness is relatively small compared to MS1200, as the difference is higher compared to MS1000 reaches more than 100 HV. Similar MS1200 and MS1400 single pulsed samples with 8.5 kA current parameter showed a huge softening in the SCHAZ and ICHAZ of up to 120 HV less than the base metal and a very slight increase in the hardness was observed in the fusion zone. The samples that were welded with current 5.8 kA showed the same pattern in hardness diagram, but with a difference in softness less than the samples that were welded with current 8.5 kA. While in the double pulses two softening zones were observed, first zone located in SCHAZ and ICHAZ and the second zone located in the fusion border, there was an increase in the hardness located in UCHAZ between the two softening zones as a result of double pulses welding parameter, see Figure 10 that shows microhardness profile photos for dissimilar samples.

The horizontal axis showing the distance from the nugget center in mm and the vertical axis showing the hardness vickers measurements value in HV0.2 The softening may occur in the HAZ's due to grains recrystallization or tempering martensite as a result of heating and cooling rates [11][26]. This phenomenon explains the occurrence of plug and button failure modes in twenty-two samples as a result the shear-tensile test as shown in Tables 5 and 6. Since the percentage of carbon in MS1400 and MS1200 is 0.2% and 0.14%, respectively [20], the reaction during RSW solidification will be peritectic reaction. As another study showed the effect of other alloys such as carbon during the solidification process. The liquid will solidify to delta ferrite first due to lack of the concentration of carbon in it, and since the solubility of carbon is higher in austenite than ferrite, the carbon will increase in its concentration in austenite as a result of the partitioning of carbon [21], and according to the isothermal transformation diagram the cooling time in the RSW is considered very short, which leads to the transform the austenite into



martensite as a result of the quenching, and this explains increasing the hardness of the Fusion Zone[11]. No defects such as cracks were detected for the similar and dissimilar RSW samples. Although martensite is the most important component of MS and DP steels that guarantees high strength, the properties of the welding point in terms of energy absorption or rather ductility must be improved by softening the areas around the fusion zone FZ while keeping a minimum strength in spot welding related to RSW design requirements in the automotive industry. Welding parameters and results of conducted tests led to several reasonable explanations based on the study of metallurgy that explained the change in hardness and other mechanical properties as a result of extreme heat and fast cooling caused by RSW in several zones in the welding spots. Other experiment of RSW was carried out on single and double pulsed martensite-ferrite DP1000 steel. Single pulse microhardness test profile showed approximately 1.5-time higher hardness in the fusion zone FZ than in the base metal while the hardness softened in the sub-critical HAZ outer boundary. Double pulse profile showed a hardness gradual rise from SCHAZ towards the FZ with a relative softening in the upper-critical HAZ compared with increased hardness in SCHAZ [19]. The diameter of the weld nugget was measured and was found a discrepancy in the nugget diameter according to the welding parameters, as the 8.5 kA welding current showed the largest diameter among the welding parameters 7.5 mm. While the diameter measurements of the weld nugget for the 6.4 and 5.8 kA current samples are 4.2mm and 3.4mm respectively, and this explains the relatively high shear-tensile strength of the samples welded with 8.4 kA current.



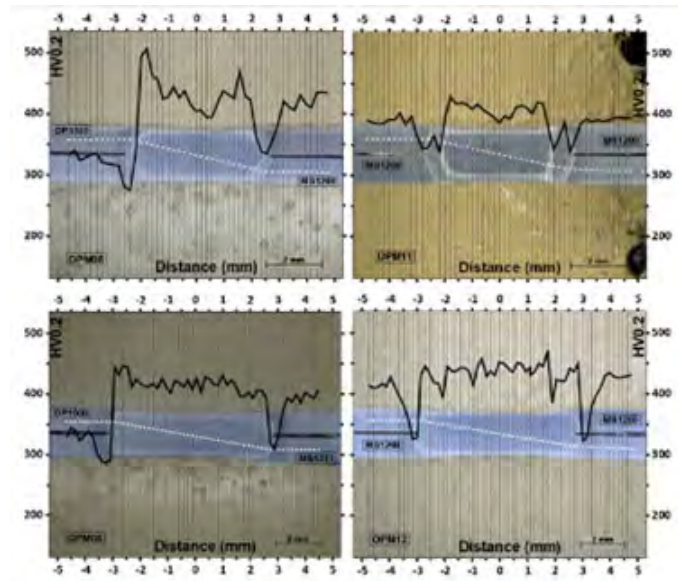


Figure 8.

Microhardness profile photos for dissimilar samples in the left and similar samples in right.

## 4 Conclusion

In this research, resistance spot welded joints were made on similar (MS1200 and MS1400) and dissimilar (DP600 – MS1400 and DP1000 – MS1200) sheets with 3 different welding technologies. Welded joints were investigated with shear-tensile tests, microhardness tests and optical microscope. The following conclusions can be drawn from this research:

- In case of similar MS1200 and MS1400 types of martensitic steel samples the best shear-tensile test results reached with long-time welding with high welding current and welding force. The weld nugget size was the biggest in this case, almost twice diameter like with other parameters. The loading capacity as a function of mm<sup>2</sup> is better in case of the other two parameter combinations, especially 2 pulses technology. During welding, softening occurs in HAZ in every case, but the amount of softening and the softened area is different. The long-time welding results the biggest hardness drop in the heat affected zone, but this zone is relatively narrow. In case of pulse technology, the hardness change is less, but the softened area is wider.
- Dissimilar welded joints were investigated too with same 3 welding parameters. In the case of DP600 – MS1400 the long-time welding with high welding current and welding force showed the best result too according to shear-tensile tests. It can be explained too by the weld nugget diameter and bigger softening. The short-time welding technology was a little bit better like pulse technology in case of shear-tensile strength, but the displacement was better with 2 pulses technology. The hardness tests show in the weld nugget relatively big hardness results (similar like MS1400). In the MS1400 side the hardness drop is bigger like in DP600. The difference between 2 pulse technology and 1 pulse technology is almost visibly in the softening.
- The other dissimilar joints were made from DP1000 and MS1200 steel sheets. The long-time welding with high welding current and welding force shows the best again. The failure mode is clearly showing the differences between the technologies in this case of joint combination, so the short-time welding was the worst and the pulse technology was better. The MS1200 side shows higher hardness values in the weld nugget and higher softening in the HAZ. The softened area of the HAZ is a little bit bigger in case of 2 pulses technology.
- In all cases the long-time welding with high welding current and welding force shows the best results, but the weld nugget diameter was big. Worth to check the 2 pulses technology with same weld nugget diameter.

## References

- [1] Zhao, Yangyang, Wurong Wang, and Xicheng Wei. "Optimization of Resistance Spot Welding with Inserted Strips via FEM and Response Surface Methodology." *Materials* 14.23 (2021): 7489: p1

- [2] Jónás, Szabolcs, et al. "Experimental and numerical study of dissimilar sheet metal clinching." AIP Conference Proceedings. Vol. 2113. No. 1. AIP Publishing LLC, 2019: p1-3
- [3] Walp, Matthew S. "Impact dependent properties of advanced and ultra-high strength steels." SAE Transactions (2007): 30-43.
- [4] Hu, Xiaohua, and Zhili Feng. Advanced High-Strength Steel-Basics and Applications in the Automotive Industry. No. ORNL/TM-2021/2047. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2021:p9
- [5] Manladan, Sunusi Marwana, Ibrahim Abdullahi, and Mukhtar Fatihu Hamza. "A review on the application of resistance spot welding of automotive sheets." J. Eng. Technol 10 (2015): 20-37: p22
- [6] Feng, Zhili. "Challenges and Opportunities in Joining Advanced High Strength Steels." Workshop On Addressing Key Technology Gaps in Implementing Advanced High-Strength Steels For Automotive Light weighting. 2012: p2
- [7] Tisza, Miklós. "Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry." Vehicle and Automotive Engineering. Springer, Singapore, 2020.
- [8] Kekik, Melih, et al. "Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints." Academic Platform-Journal of Engineering and Science (2021): p1
- [9] Kimchi, Menachem, and David H. Phillips. "Resistance spot welding: fundamentals and applications for the automotive industry." Synthesis Lectures on Mechanical Engineering 1.2 (2017): i-115: p9
- [10] World auto steel Homepage, <https://ahssinsights.org/tag/microstructure/>
- [11] Li, Yunzhao, Huaping Tang, and Ruilin Lai. "Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spot Welded Martensitic Advanced High Strength Steel." Processes 9.6 (2021): 1021.
- [12] Rezayat, H., et al. "Correlation of local constitutive properties to global mechanical performance of advanced high-strength steel spot welds." Metallurgical and Materials Transactions A 51.5 (2020): 2209-2221.
- [13] Williams, Neville T. "Resistance spot welding." ASM handbook 6 (1993): 226-229.
- [14] Krajcarz, Florent, A-F. Gourgues-Lorenzon, and Emmanuel Lucas. "Influence of carbon content on the primary solidification mode of high strength steels in resistance spot welding conditions." Scripta Materialia 120 (2016): 98-102.
- [15] Amirthalingam, Murugaiyan, et al. "Elemental segregation during resistance spot welding of boron containing advanced high strength steels." Welding in the World 59.5 (2015): 743-755.
- [16] Pouranvari, M., S. Sobhani, and F. Goodarzi. "Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced high strength steel: Microstructure-properties relationship." Journal of Manufacturing Processes 31 (2018): 867-874.
- [17] Májlinger, Kornél, Levente T. Katula, and Balázs Varbai. "Prediction of the Shear Tension Strength of Resistance Spot Welded Thin Steel Sheets from High-to Ultrahigh Strength Range." Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 66.1 (2022): 67-82.
- [18] RESISTANCE WELDING APPLICATIONS AND CONTROLS PRODUCTION ENGINEERING Master Distributor – Tuffaloy, CMW, Entron, ACP 1-888-654-WELD (9353): p14
- [19] Prém, László, Zoltán Bézi, and András Balogh. "Development of resistant spot-welding technology for automotive ferrite-martensitic dual-phase steels with joint application of finite element modelling and experimental research." Advanced Materials Research. Vol. 1138. Trans Tech Publications Ltd, 2016.P44
- [20] SSAP Homepage, Martensitic steel: excellent formability-to-strength ratio, <https://www.ssab.com/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades/martensitic-steel>.
- [21] Lesch, Christian, Norbert Kwiaton, and Frank B. Klose. "Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications– tailored properties by smart microstructural adjustments." Steel research international 88.10 (2017): 1700210.
- [22] World auto steel Homepage, AHSS Application Guideline, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>
- [23] Béres, Gábor, and Zoltán Weltsch. "Estimation of strength properties from microhardness results in dual phase steels with different martensite volume fraction." Periodica Polytechnica Transportation Engineering 47.3 (2019): 206-212. P2.
- [24] Tisza, Miklós. "Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry." Vehicle and Automotive Engineering. Springer, Singapore, 2020.P84.
- [25] Dancette, Sylvain, et al. "Finite element modeling of deformation and fracture of advanced high strength steels dissimilar spot welds." Engineering Fracture Mechanics 258 (2021): 108092.P7-8.
- [26] Baltazar Hernandez, Victor Hugo. "Effects of martensite tempering on HAZ-softening and tensile properties of resistance spot welded dual-phase steels." (2010). P79-112

# NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKBÓL KÉSZÜLT HEGESZTETT SZERKEZETEK KRITIKUS VARRATAINAK UTÓKEZELÉSI LEHETŐSÉGEI

## POSSIBILITIES OF POST-TREATMENTS ON CRITICAL JOINTS OF WELDED STRUCTURES MADE OF HIGH STRENGTH STEELS

**Sas Illés**

Elektro-MontőRING Kft.,  
Jászberény  
sas@elektromonitoring.hu

**Prof. Dr. Lukács János**

Miskolci Egyetem,  
Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet  
3515 Miskolc, Egyetemváros  
janos.lukacs@uni-miskolc.hu

*Napjainkban a nagyszilárdságú acélok, gazdaságossági és környezetvédelmi megfontolások alapján, egyre szélesebb körben jelennek meg a hegesztett szerkezetekben. A nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett szerkezetek, például mobilidaruk, anyagmozgató gépek és bányászati berendezések gyártása során a hegesztéstechnológia jelentősen befolyásolhatja a szerkezet élettartamát. Tekintettel ezen mérnöki szerkezetek funkciójára, a biztonságos üzemelés feltétele – mind tervezési mind gyártási szempontból – a hegesztett kötések megfelelő élettartammal bíró kivitelezése. A nagyszilárdságú acélok esetében az élettartamra jelentős hatása van az alacsonyabb alakváltozó képességnek, a hidegrepedésekkel szembeni fokozott érzékenységnek, a hegesztés utáni maradó feszültségeknek és a hegesztett kötések geometriájának. A hidegrepedési hajlam megfelelő hegesztéstechnológiai paraméterek megválasztásával jól kézben tartható, azonban a hegesztés utáni maradó feszültségek és a varratgeometria – még megfelelően megválasztott hegesztési technológia mellett is – jelentős szerepet játszik a hegesztett szerkezet élettartamában. A hegesztett kötés geometriájának kritikus részei a varrat átmenetek, az alapanyag és a varrat beolvadási határvonalai, illetve – több soros varrat esetén – a varratsorok közötti beolvadás felületi vonalai. Ezek a részek kritikus esetben bemetszésként viselkedhetnek és azokban, a hegesztés utáni maradó húzófeszültségek hatására, repedések keletkezhetnek. A szerkezet üzemelése során a repedés tovább terjedhet és az alacsony alakváltozó képesség miatt a szerkezet (akár hirtelen) tönkremeneteléhez vezethet. A hegesztett kötések utókezelésével azt célozzuk meg hogy ezen részek fáradási tulajdonságaiban javulást érzünk el. A hegesztett kötések utókezelési lehetőségeit, az alapján, hogy melyik területen érnek el eredményt, két csoportba sorolhatjuk, így megkülönböztethetünk a maradó feszültségek csökkentését, átalakítását vagy a hegesztett kötés geometriájának javítását célzó módszereket. Számos technológiai lehetőség adódik a hegesztett kötések utókezelésének elvégzésére azonban ezen módszerek a nagyszilárdságú acélokon, mind anyagszerkeztani mind gazdaságossági megfontolások alapján, korlátozottan alkalmazhatóak. Az előadás célja a nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett kötések kritikus átmeneti zónáinak és azok utókezelési lehetőségeinek áttekintése, gyakorlati tapasztalatok és alkalmazások bemutatásán keresztül.*

*Nowadays, high-strength steels, based on economic and environmental considerations, are becoming more and more widespread in welded structures. In the manufacture of welded structures made of high-strength steels, such as mobile cranes, material handling machines and mining equipment, welding technology can significantly affect to the life time of the structure. Given the functions of these engineering structures, the condition of their safe operation is the appropriate life time of the welding joints, based on both design and manufacturing considerations. In the case of high-strength steels, the life time is significantly affected by lower deformation capability, by increased cold cracking sensitivity, by welding residual stresses and by the geometry of the welding joints. The sensitivity of cold cracking can be well controlled by selection appropriate welding parameters; however, the welding residual stresses and the welding joints geometry – even with a proper welding technology – play significant role in the life time of the welded structures. Critical parts of the welding joints geometry are the welding toes, the junction lines of the base material and the welding seam, and in case of multi-pass welding the junction lines between the welding layers too. In critical cases, these lines can behave as notches and cause cracks in the welding joint due to the tensile welding residual stresses. During the operation of the welded structures the cracks can be growth further and, due to the lower deformation capability of the high strength steels, can be led to failure of the structure (even suddenly too). The aim of the post-treatment of the welded joints is to improve the fatigue properties or resistance of these areas. The post-treatment possibilities of welded joints can be divided into two groups, based on the affected area, so that we can distinguish between methods aimed reducing or transforming the welding residual stresses or improving the welding joint geometry. Even though there are numerous technological possibilities for the post-treatment of welded joints, these methods have limited applicability to high strength steels for microstructural and economic reasons. The aim of this paper is to review the critical transition parts of welded joints made of high-strength steels and their post-treatment possibilities, based on our practical experiences and applications.*

# HEGESZTÉSI BIZTONSÁGI ZÓNÁK KIALAKÍTÁSA AUTOMATIZÁLT GYÁRTÁS ESETÉN

## ESTABLISHMENT OF WELDING SAFETY ZONES FOR AUTOMATED MANUFACTURING

**Schramkó Márton**

Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, 1081 Budapest Magyarország

[schramko.marton@bgk.uni-obuda.hu](mailto:schramko.marton@bgk.uni-obuda.hu)

**Dr. Kovács Tünde**

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai kar, 1081 Budapest Magyarország

[kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu](mailto:kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu)

### Absztrakt:

Az ívhegesztés során számos a hegesztőre egészségkárosító hatás keletkezik. A szerzők az ultraviola sugárzás (UV) hatásintenzitását kívánták meghatározni a hegesztéstől való távolság függvényében. A kutatás a huzal elektródás ívhegesztési eljárás során képződő UV sugárzásra koncentrál, mivel ez napjainkban az ipari gyakorlatban széles körben alkalmazott eljárás. A kísérlet során a huzal elektródás védőgázos ívhegesztési eljárásra végeztünk széleskörű vizsgálatokat. Ezt az eljárást az iparban gépesítetten is használják, emiatt a kutatás segíthet egy adott biztonsági zóna kijelöléséhez egy ipari területen, hogy ne kelljen függönnyel/fallal elválasztani a hegesztőgépeket, de ugyanakkor közlekedni lehessen közöttük. Ahol pedig még nincs gépesített gyártás, ott felhívja a figyelmet az egészség károsodást okozó problémákra, hogy biztonságosabb munkafeltételek megteremtésére adjon lehetőséget.

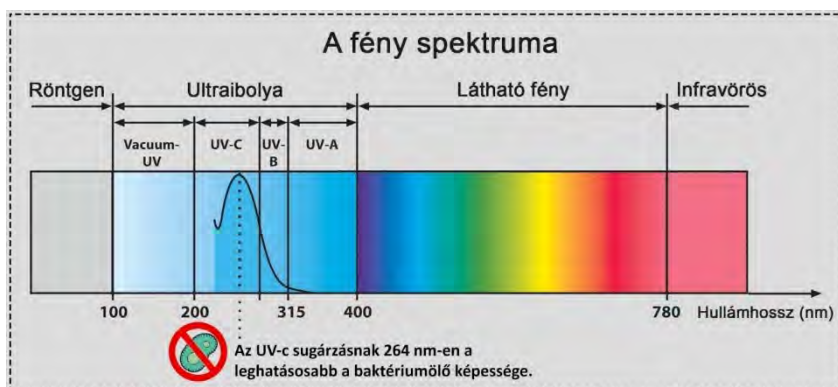
### Abstract

Arc welding produces several adverse health effects for the welder. The authors want determines the intensity of ultraviolet radiation (UV) as a function of distance from the weld. The research focused on the UV radiation generated during the arc welding process, as it is a widely used process in industrial practice today. During the experiment, extensive tests were performed on the gas metal arc welding process. This procedure is also used by automatization in the industry, so the research can help to designate a specific safety zone in an industrial area to work without wall-separation of the machines, and travel between them be simple. And in the case of the not automatized production yet, it draws attention to the problems that cause health damage and provides opportunities to create safer working conditions.

## 1. Bevezetés

### 1.1 Az ultraviola sugárzás

Az ultraibolya (UV) sugárzás az elektromágneses sugárzások közé tartozik. Ebben a sugárzás fajtában két fő típus található a látható és a nemlátható, az UV a nemlátható spektrumban található, ahogyan az az 1. ábrán is látható. Az UV-sugárzás az elektromágneses sugárzási skálán a 100-400 nm között hullámhossztartományban található. A skála tovább besorolható három fő csoportba: 315-400 nm-es UV-A sugárzás, 280-315 nm-es UV-B sugárzás és 100-280 nm-es UV-C-sugárzás [1]. A mindennapjainkban az UV-sugárzás fő forrása a nap. Legnagyobb mennyiségben UV-A érkezik a földfelszínre, ezután kevesebb az UV-B, az UV-C-t pedig teljes egészében elnyeli a sztratoszférában lévő ózonréteg. Az ívhegesztés során az UV spektrum teljes skálája kibocsátásra kerül a hegesztőívből [2]. Emiatt az ívhegesztés esetén az UV-C sugárzást nem lehet figyelmen kívül hagyni, miután nincs jelen az UV-C sugárzást csökkentő ózonréteg. Amiatt, hogy az UV-C sugárzást az ózon réteg kiszűri a legtöbb kutatás figyelmen kívül hagyja, emiatt nem sok irodalmi adat áll rendelkezésre a témában. Azonban miután hegesztés által kibocsátott UV sugárzás esetén nincs szűrve nem tekinthetünk el az UV-C sugárzástól miután ez a legkártékonyabb. Az UV sugárzás minden spektrumát mérnünk kell, ez alapján kell a veszélyes szintet meg határozni, hogy az emberi szervezet egészségügyi kockázatát minimálisra csökkentjük.



1. ábra

A fény spektruma [3]

## 1.2 Az ultraviola sugárzás egészségre gyakorolt hatása

Az UV sugárzás több szervezetre káros hatással jár, melynek súlyossága az enyhétől a halálos kimenetelig terjed. Az enyhébb kimenetelű mellyel a mindennapokban is találkozhatunk a bőr felületén elszenvedett égési sérülés (leégés), a skála másik felén a halálos kimenetelű rákos megbetegedések állnak. Emiatt fontos a megfelelő biztonság biztosítása minden dolgozó számára. Leggyakoribb problémák melyek az UV sugárzás hatására kialakulhatnak. Szaruhártya gyulladás, melynek az oka a magas mennyiségű UV-A/B/C sugárzás behatása a szemre, ez a probléma kezelés nélkül is elmúlik 2 napon belül. A szem hosszú távú UV sugárzásnak való kitétsége növeli a szürkehályog és makuladegeneráció kialakulásának esélyét. Az UV-B és UV-C sugárzás közvetlenül és közvetve, az UV-A csak közvetve - reaktív oxigén gyököket létrehozva károsítja a DNS-t. A bőr esetében a hosszú távú folyamatos UV kitétség a bőr öregedéséhez, majd bőrrák kialakulásához is vezethet. Ezen felül immunrendszeri problémákat is okozhat. [4]

## 1.3 A megengedett napi UV sugárzási határérték meghatározásának módszere

Az UV sugárzásra értelmezhető egy napi maximális határérték, mely megadja, hogy az adott dolgozó mennyi időt tartózkodhat egy adott intenzitás mellett az UV-nak kitétt területen. Ez a határérték  $mW/cm^2$ -ben van megadva és a napi megengedett érték  $3 mW/cm^2$  ennél nagyobb mennyiség már károsíthatja a dolgozó egészségét. Ennek értelmezésében segítséget adhat az egyik mérés eredménye melyet egy borús téli napon a szabadban végeztünk, ahol a napból származó UV sugárzás mértéke  $0,001-0,002 mW/cm^2$ -volt. Ebből következne, hogy 30-60 percet lehetne biztonságosan eltölteni a szabadban. Ezt módosítani kell, ugyanis a határérték megadásánál az UV-C sugárzást is figyelembe kell venni, amit az ózónréteg teljes mértékig kiszűr, így az értékek pozitívan módosulnak [5].

Az ultraviola sugárzásra megállapíthatunk egy egész napra értelmezhető biztonsági értéket. Ennek kiszámítására a következő két képlet ismeretére van szükség [6].

$$E_{eff} = \sum_{180}^{400} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

$$t_{max} = \frac{3 mJ/cm^2}{E_{eff}} \quad (2)$$

Ahol:  $E_{\lambda}$  speciális sugárzás [ $W/(cm^2 \cdot nm)$ ];  $S(\lambda)$  relatív spektrális hatékonyság [-];  $\Delta\lambda$  a középső hullámhossz [nm]. A második összefüggésben a  $3 mJ/cm^2$  értéke a napi megengedett értéknek felel meg ezt ha értelmezni szeretnénk a mérő műszerrel, úgy értelmezhetjük, hogy 1 másodpercig tehetjük ki magunkat  $3 mW/cm^2$  nm – es UV sugárzásnak egy nap során [7].

Az első képlet megadja a sugárzás hatásfokát. A második pedig a napi megengedett határértéket.

## 2. Kísérletek

Az ívhegesztés esetében az UV sugárzás egy elkerülhetetlen velejáró veszélyforrás. Emiatt jelenleg is vannak a védekezést szolgáló szabályok, például: a bőrfelületek ruhákkal való eltakarása vagy a hegesztő maszkok, pajzsok vagy védő szemüvegek. Ezek a védelmi felszerelések sok éve használatban vannak és főleg az UV fény elnyelésére, kitarakására

koncentrálják, de csak a közvetlen viselőt védik. A hegesztő csarnokokban függönyökkel, paravánokkal választják le az egyes hegesztő állomásokat így védve a többi hegesztőt. A felvetés abból adódott, hogy az adott sugárzási intenzitás ismeretében kialakítható egy hegesztési biztonsági zóna, így nincs szükség az állomások teljes eltakarására. Tehát, a kijelölt útvonalon haladó személy veszély mentesen haladhat át az egyes hegesztő munkahelyek között.

## 2.1 A kísérlet menete

A kísérletek során egy a 2. ábrán látható elrendezést alkalmaztunk, mely a munkadarabtól való távolság függvényében méri a hegesztés során keletkező UV sugárzás mértékét. A képen jól látható, hogy az UV mérő fix helyen rögzített, miközben a hegesztést végezzük, emiatt a sugárzást kibocsátó pont, hegesztő ív folyamatosan távolodik (a hegesztett varrat hossza mentén) a mérő műszertől így a kísérlet során egy intervallumot kapunk, ahol a legnagyobb intenzitású sugárzás az ív gyújtás pillanata, majd innentől folyamatosan csökken az intenzitás, ahogyan a hegesztőfej távolodik. A kísérlet során több mérési pontot vizsgáltunk a hegesztéstől távolodva 0,5 m-től haladva 2,5 m-es távolságig.



2. ábra

A kísérleti beállítás

A hegesztés során 3 különböző alkalmazott gázkeverék:

- C1 (CO<sub>2</sub>)
- M21 (82% Ar-18% CO<sub>2</sub>)
- M20 (10% CO<sub>2</sub> - 30% He - 60% Ar)

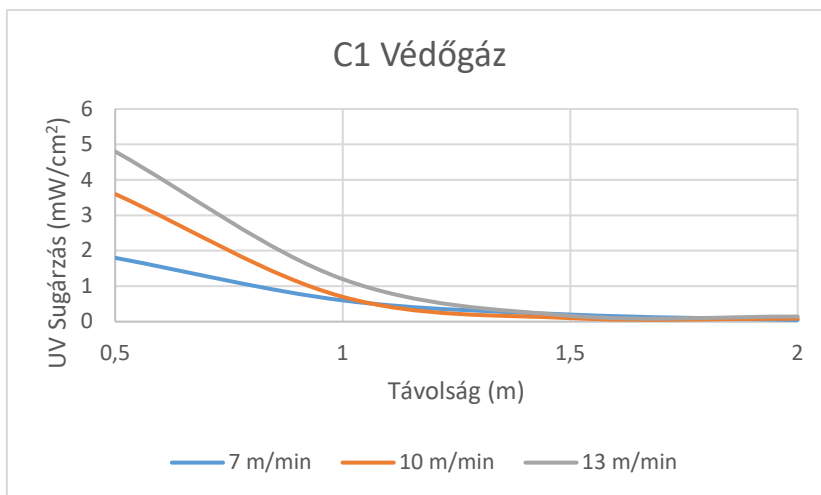
A fő cél az UV sugárzás változásának jellegének és mértékének meghatározása volt a távolság függvényében a különböző gázkeverékek esetében. A három gázkeverékkel több előtolási sebességgel végeztünk kísérleteket ezeknek adatait az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat

A hegesztésnél használt paraméterek			
Áramerősség	~ 240 A	~ 202 A	~ 167 A
Előtolás	13 m/min	10 m/min	7 m/min
Állandó paraméterek			
Hegesztő anyag	SG2	szabad huzalvég	22 mm
Munkadarab anyaga	S235JR	huzal vastagság	1 mm

## 3. Eredmények

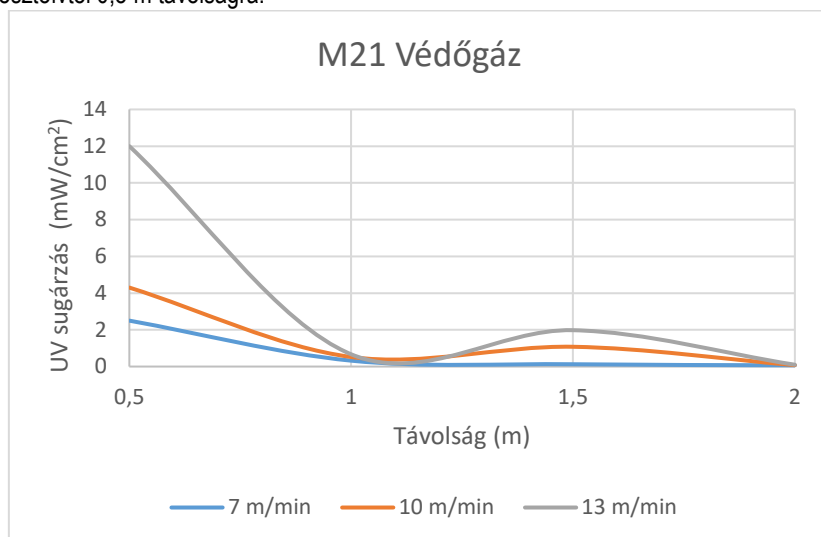
Az eredményeket a 3-5. ábrák foglalják össze. A kísérletek eredményeiről el lehet mondani, hogy mindegyik védőgáz esetében exponenciálisan nő az UV sugárzás mértéke a hegesztési ívhez közeledve. Az irodalmi hivatkozásokban talált eredmények összhangban vannak a mérési eredményekkel [8].



3. ábra

Az UV sugárzás a távolság függvényében a C1 védőgáz esetén

A kísérletekben az ipari alkalmazásokban leggyakrabban alkalmazott gázokat (C1, M20, M21) használtunk. A 3. ábra a CO<sub>2</sub> védőgáz hatását mutatja a hegesztés során. Arra a következtetésre jutunk, hogy az UV sugárzás szintje a hegesztőáramtól függ a legnagyobb mértékben, a nagyobb áram nagyobb sugárzást eredményez. A mért maximális UV sugárzási szint 4,8 mW/cm<sup>2</sup> volt a hegesztőívől 0,5 m távolságra.

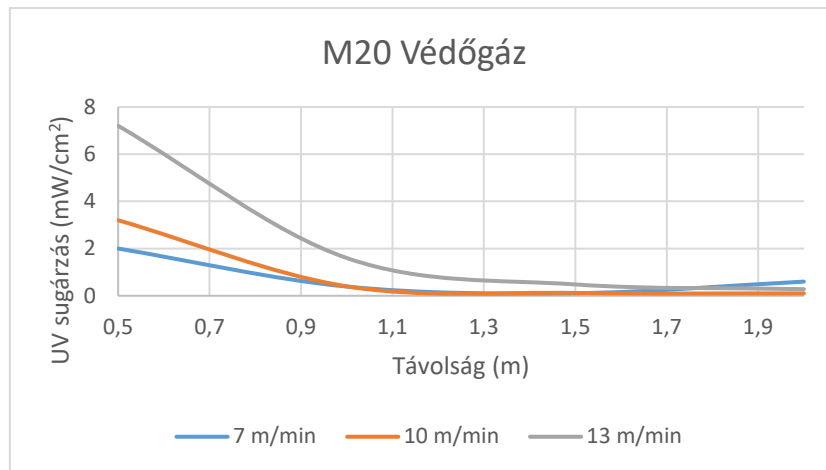


4. ábra

Az UV sugárzás a távolság függvényében a C1 védőgáz esetén

A 4. ábrán látható az Ar és CO<sub>2</sub> gázkeverék hatása a hegesztés során kialakuló UV sugárzás mértékére. Megállapítható, hogy az Ar gáz UV elnyelő képessége kisebb, mint a CO<sub>2</sub> gázé. Ezen kívül láthatjuk az aktuális hatást is. A nagyobb hegesztőáram nagyobb UV sugárzást okoz. A mért maximális sugárzás az alkalmazott M21 védőgáz esetén 12,2 mW/cm<sup>2</sup> volt a hegesztőívől 0,5 m távolságban, ami nagyobb, mint a tiszta CO<sub>2</sub> gáz esetében.





5. ábra

Az UV sugárzás a távolság függvényében a C1 védőgáz esetén

Az 5. ábrán az Ar; He; CO<sub>2</sub> kevert védőgáz hatást mutatja a hegesztés során. A jelenlegi tendencia hasonló a C1 és M21 védőgáz eredményekhez. Az M20 védőgáz magasabb UV-védőhatást mutat, mint az M21 gáz, de kisebb, mint a C1 gáz.

## 4. Összefoglalás

A kísérletek során megállapítottuk, hogy a kibocsátott UV sugárzást a legnagyobb mértékben az áramerősség befolyásolta, de a védőgáz összetétele sem elhanyagolható a folyamat során. A kapott eredményekből azt állapíthatjuk meg, hogy az UV sugárzás a hegesztéstől való távolság növekedésével nagyban csökken. Ha figyelembe vesszük a különböző védőgázok UV elnyelő képességét, a napi megengedett határértéket és a hegesztő állomások egymáshoz képest mért távolságát meghatározhatóvá válik egy virtuális veszélyzóna. Ennek az eljárásnak a használatával könnyen tudunk nagy munkadarabok környezetében akár egy kréta segítségével munkaterületet kijelölni, vagy egy üzemben a gépek között egy biztonságos útvonalat meghatározni. Illetve egy virtuális interfész megalkotásával folyamatosan mérhetővé válik a napi UV sugárzás, amit a dolgozó elszenved ezzel csökkentve az egészségügyi kockázatokat.

## Irodalomjegyzék

- [1] Gallagher, R. P., Lee, T. K., Bajdik, C. D., Borugian, M.: Ultraviolet radiation. Chronic diseases in Canada 29, 51-68 (2010)
- [2] Dixon, A. J., Dixon, B. F.: Ultraviolet radiation from welding and possible risk of skin and ocular malignancy. Medical Journal of Australia 181, 155–157 (2004).
- [3] <https://www.germicidlamp.hu/informaciok/uv-technologia> (2022.04.12)
- [4] Gallagher, R. P., Lee, T. K., Bajdik: Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review, Progress in Biophysics and Molecular Biology 92, 119-131 (2006)
- [5] Jyunya Takahashi, Hitoshi Nakashima, Nobuyuki Fujii, Tsutomu Okuno. Comprehensive analysis of hazard of ultraviolet radiation emitted during arc welding of cast iron; J Occup Health. 2019,00:1–10
- [6] Takahashi, J., Nakashima, H., Fujii, N., Okuno, T.: Comprehensive analysis of hazard of ultraviolet radiation emitted during arc welding of cast iron. Journal of Occupational Health. 00, 1-10 (2019). doi:10.1002/1348-9585.12091
- [7] TLVs and BEIs Based on the Documentation Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, 2020 ACGIH, ISBN: 978-1-607261-12-4
- [8] O., E. Otokpa, Y. B Usman: An assessment of ultraviolet radiation components of light emitted from electric arc and their possible exposure risks, Global Journal of Pure and Applied Sciences Vol.19. 2013:145-149 doi:10.43146gjpas.v19i1.18

# ELLENÁLLÁS-MIKROHEGESZTÉS LEHETŐSÉGEI HWH-iSpotHFG nagyfrekvenciás hegesztőrendszerrel

## RESISTANCE MICRO WELDING OPTIONS by HWH-iSpotHFG high-frequency welding system

**Tóth László**  
ReWeRob Kft., Cegléd  
tl@rewerob.hu

**Kovács Csaba**  
REHM Kft., Tápíószele  
kc@rehm.hu

*Minthogy az autóipar a minőségi és a tartós kapcsolatok érdekében az elektronikai- és kis alkatrészek sajtolt, forrasztott stb. kötéseit felváltotta hegesztettekkel, továbbá a járművek hibrid, elektromos, tüzelőanyagcellás rendszerei tovább fokozták a mennyiséget, valamint az ellenállás-mikrohegesztés „hagyományos” termékeit tekintve (pl. fényforrások stb.), szükségét láttuk bemutatni, hogy miért kell másképp gondolkodni, miféle változók kerülnek előtérbe és ezek közül melyek kezelhetők a HWH-iSpotHFG hegesztőrendszer vezérlésével. Kulcsszavak: EH, mikrohegesztés, HFDC*

*As the automotive changed the pressed, soldered, etc. connections of electronic and small parts for the sake of quality and durable joints furthermore the hybrid, electric, fuel cell systems in vehicles increased the volume, and with respect to the “traditional” products of resistance microwelding (e.g., lightbulbs, etc.), we have seen the need to show why we need to think differently about what variables come into view and which of them can be operated by controlling the HWH-iSpotHFG welding system. Keywords: RW, micro welding, HFDC*

### 1. A mikrohegesztésről

Mikrohegesztés – amióta hegesztés van – mindig is létezett, gondoljunk csak a régészeti leletekben talált ékszerekre. A magyar szaknyelvben jelenlétét az 1985-ben megjelent, Baránszki-Jób Imre által szerkesztett Hegesztési kézikönyv is bizonyítja a mikroplazma-hegesztés és az ellenállás-mikroponthegesztés ismertetésével [1]. Természetesen további hegesztőeljárásoknál is alkalmazható, különösen a jól szabályozható – elektronsugár, lézer, ultrahangos – energiaforrásúaknál, ill. a teljesítménymodulációs (waveform controlled) MIG/MAG és TIG esetén. A palettát tovább színesítik azok az eljárásváltozatok, amelyeket az alkalmazástechnikai igények fejlesztettek ki. A továbbiakban a tárgyalást az ellenállás-mikrohegesztő eljárásváltozatokra szűkítjük, a mikrohegesztés többi eljárása után érdeklődőknek ajánljuk a Hegesztéstechnika folyóirat cikkét [1].

Az ellenállás-hegesztés (főcsoportja 2) gyakori csoportjai az ellenállás-ponthegesztés (21), -vonalhegesztés (22), -dudorhegesztés (23) és a különböző -tompaheszesztések (leolvasztó 24, zömítő 25). Az említettekhez a szabványban [2] megnevezve 12 alcsoport van, azonban még legalább ugyanennyi ismert eljárásváltozat nem szerepel ebben a szabványban. A képet árnyalja, hogy ugyan vannak a mikrohegesztésnek saját eljárásváltozatai, alcsoportjai (pl. hőszegecselés, kompaktálás stb.) azonban valamennyi említett csoportra – pont, vonal, dudor, tompa – jellemző a mikrováltozat.

Az ellenállás-hegesztés (2) egységes eljárás, azonos fizikai alapokkal, azonban a munkadarabok mérete, követelményei az alkalmazandó berendezésekkel és eszközökkel – sőt az eljárás változóinak beállításával szemben – mégis két eléggé eltérő gondolkodást igényel. Az egyszerűsítés érdekében a szétválasztás fő szempontja az anyagvastagság, kicsi, ill. nagy, és a nagyobb vastagság esetén az autóiipari lemezhegesztéseket külön kezeljük az egyedi és fokozott előírásai és ipari nagysága alapján a többi ipari alkalmazástól, melyek közül talán a háztartási készülékek gyártását említhetjük jól ismertnek. Az eltérő gondolkodás magyarázata, indoklása annyiban tárgya jelen értekezésnek, amennyiben az eszközhasználat megértéséhez szükséges. Az eltérések megértéséhez ajánljuk azt a tanulmányt [3], amelyben a szerzők összehasonlítják a változók meghatározásának különbségeit, például hogyan és miért választjuk másként a hegesztőelektródákat.

A két ellenállás-hegesztési terület jellemző iparági felosztása:

- ipari ellenállás-hegesztések,
- autóiipari lemezhegesztések,
- mikrohegesztések.

## 2. Ellenállás-mikrohegesztés

### 2.1 Alkalmazási terület

A legtöbb ellenállás-ponthegesztés a felsorolt három iparági kategória valamelyikébe tartozik. A „nagy léptékű” (LSRSW – 'large scale' resistance spot welding) többek között az autóiparban használt, igen sokfajta acél és rozsdamentes/korrózióálló acél anyagok hegesztését foglalja magában, többnyire 0,4-0,6 mm feletti lemezvastagságban. A „kis léptékű” (SSRSW – 'small scale' resistance spot welding) ellenállás-ponthegesztés felé haladva a fent említett anyagokat, valamint a színesfémeket, molibdént, volfrámot, alumínium-, ezüst-, réz- és nikkelötvözeteket találjuk többnyire 0,5 mm-nél kisebb vastagságban. Az elektronikai alkatrészek és készülékek gyártása során egyre nagyobb szükség van nagyon vékony fémlamezek ellenállás-hegesztésére, ahol az alsó határ a nanofólia (pl. a 20 nm vastag fémüveg ötvözet, az elterjedt hibaárammegszakítók fontos alkatrészeként).

Korunk eredménye, hogy az autóipar ebben a kategóriában is egyre nagyobb részt hasít ki, mivel a járművekben hihetetlen mértékben növekszik az elektronikai alkatrészek aránya. A hagyományos vezetékcsatlakozások, relék, kapcsolók, záruk, generátor, mozgatómotorok stb. mellett egyre több az érzékelő, az automatikai alkatrész, áramköri modulok száma, az akkumulátoros és tüzelőanyagcellás hajtás elemei. Az előretörés az autóipar hosszabb – 5-8 év – garanciavállalásaikor kezdődött, mert a sajtolt vagy forrasztott kötések, csatlakozások élettartama a rezgő és korrózióknak kitett körülmények között ezt nem teljesítette kellő elégedettséggel.

Az ellenállás-hegesztés mikrováltozatának jellemző területei:

- autóipar: vezetékcsatlakozások, biztonsági elektronika (pl. légzsák), érzékelők, áramköri modulok
- villamos szerelvények gyártása: elemi szálás rézvezetékvezégek (kompaktálás), csatlakozódugók, -aljzatok, kapcsolók stb. érintkezői, olvadó biztosítékok
- villamos forgógépek lakkszigetelésű huzaljai
- fényforrások (különösen izzólámpák), katódsugárcsővek
- félvezetők, szenzorok, érzékelők, teljesítményelektronika félvezetői
- elektronikai eszközök alkotóelemei, telekommunikációs és számítástechnikai eszközök
- energiatárolók, akkumulátorcellák
- orvosi eszközök, bio implantátumok
- finommechanikai alkatrészek
- egyéb alkalmazások (ellenállás-keményforrasztás, hőszegecselés stb.)

### 2.2 Műszaki előírások

Ellenállás-mikrohegesztésre vonatkozó érvényes magyar szabványt nem találtunk, legfeljebb az ilyen termékek kötésszilárdsági vizsgálatára vonatkozót. A Hegesztés és rokon technológiák kézikönyv, ill. a Hegesztési zsebkönyv tárgymutatóiban nincs nyoma, érthetően, mert a mikroalkalmazás nem változtatja meg az eljárás elméleti és gyakorlati alapjait (ezt a hiányt a Hegesztési zsebkönyv készülő átdolgozott kiadása meg fogja szüntetni). Miközben 2005-ben az egyik internetes keresőprogram (Google) a „micro welding” keresőszóra 13 500 találatot adott [1], ma ugyanez a szám több mint 70 millió! Szűkítve a keresést: „resistance micro welding” 10 millió, „micro resistance spot welding” 6,5 millió.

Biztosra mehetünk, ha a DVS Média kiadványai között keresünk, mert amit műszaki ember művel és szabvány még nincs, arra biztosan van német előírás vagy irányelv. 2007 és 2017 között tíz éven át több száz oldalas Mikrokötések évkönyveket is megjelentettek szakcikkekkel, színes ábrákkal, táblázatokkal és az aktuális vonatkozó DVS műszaki jelentések, DIN-EN-ISO szabványok jegyzékével. Szabvány elsősorban a termékekre, anyagokra, gépekre és a biztonságra található, az ellenállás-mikrohegesztő eljárásokkal kapcsolatban műszaki jelentés a villamos érintkezők, a lakkszigetelésű huzalok hegesztéséről, a kis alkatrészek ellenállás-dudorhegesztéséről, továbbá az elektronikai és finommechanikai ellenállás-hegesztés alapjairól, valamint ezek kötéseinek vizsgálatairól van. Jellemzően a felszerelésgyártókra bízzák, hogy alkalmazástechnikai leírásokkal lássák el a felhasználóikat.

### 2.3 Az eljárás fő változói

A szokásos eljárások az ellenállás-mikrohegesztésben a DVS műszaki jelentése [4] alapján:

- ponthegesztés
- dudorhegesztés

- vonalhegesztés
- részhegesztés
- zömítő tompahegesztés
- hőszegecselés (hot-staking)
- különleges eljárásváltozatok

Megemlítendő még az ellenállás-keményforrasztás (918) és -lágyforrasztás (948). A fő változók meghatározása minden eljárásváltozat esetén azonos alapokon történik. Az autóiipari lemezhegesztéseknél segédletként használt paramétertáblázatok erre a tartományra nem terjednek ki, továbbá a munkadarabok anyagválasztéka, -párosítása, -vastagsága, kötésgeometriái a mikrokötéseknél olyan széles választékot mutatnak, hogy a változókat jobb az adott körülményekhez egyedileg megállapítani. A technika mai állása szerint számítógépes szimulációval a valóságot megközelítő eredményt érhetünk el mikrohegesztések esetén is [5]. A szimulációval szinte minden egyéb körülményt (pl. bevonatok anyaga, -vastagsága, hibás érintkezés, szennyeződés, környezeti hőmérséklet stb.) figyelembe vehetünk. A szimulációhoz szükséges beruházásnak sajnos határt szab a megtérülési ésszerűség, így kisebb volumenű feladatoknál marad az emberi megfontolás és a kísérleti hegesztések.

Összefoglaljuk ellenállás-mikrohegesztésekre a változók meghatározásának menetét.

Előzetesen:

- a kötés keresztmetszet kívánt mérete (a táblázatok használatánál ezt sokan nem veszik figyelembe és utána nagyon meglepődnek)
- a kötéssel szemben támasztott követelmények (szilárdság, minőség, kikészítés)
- a rendelkezésre álló hegesztőberendezés megfelelőségének ellenőrzése (áramforrás, teljesítmény, vezérlés, erőtartomány, működési sebesség, minőségbiztosítás stb.)
- az elektróda méretének, alakjának és anyagának kiválasztása (fontos még a hozzáférés, esetleg az egyoldali vagy kétoldali hegesztés eldöntése, ha a munkadarab vagy a gép ezt lehetővé teszi)

A lényegre fókuszálva:

- elektródaerő (az anyagminőségre és eljárásra jellemző fajlagos  $N/mm^2$  tartomány)
- hegesztőáram (az anyagminőségre és eljárásra jellemző fajlagos  $A/mm^2$  tartomány, az érintkezőfelületre és külön a heglencse-keresztmetszetre)
- hegesztési idő megválasztása (a lehető legrövidebbre)
- munkarendi elemek (előmelegítés, áramfelfutás stb.) meghatározása

Ezek a felsorolt lépések előre pontosan meghatározhatók számítógépes szimulációval [5], beleértve a szövetszerkezeti eredményt és pl. a kötés szakítóvizsgálatát. Az autóiiparban használatos hegesztőberendezések közül nagyon sok jól használható mikrohegesztésre, különösen a középfrekvenciás egyenáramú (MFDC) gépek, de még a váltakozó áramúak (AC) is, azonban számos olyan feladat van, amely eltérő és adott esetben a kis méret ellenére is igen drága berendezést igényel.

## 2.4 Különbségek a berendezésekben

A különbségeket a vékony anyagok következményein túl főleg az anyagminőségek változatossága okozza. A szinte valamennyi fém és fémtövezet mellett előforduló kompozitok és műanyagok, szigetelt huzalok.

Az ömlesztett (fúziós) kötéstípus mellett több szerepet kap a diffúziós (szilárfázisú, termokompressziós) kötés, amely az eltérő anyagminőségű alkatrészeknél – sőt kerámiaanyagoknál – gyakori [6]. A folyasztószeres keményforrasztású kötésekkel a teljesség kedvéért – és az iSpot használatára tekintettel – említjük. A pont- helyett a dudorhegesztés előnyös az elektródák élettartamának növelése érdekében és a nagyon különböző vastagságú anyagok esetén.

Ellenállás-mikrohegesztés változóira jellemző:

- áramerősség 3-3000 A
- elektródaerő 1-500 N
- egyenáramnál felcserélhető polaritás (akár a munkaciklus közben)

A váltakozóáramú (AC), az energiatárolós (CD) és a középfrekvenciás egyenáramú (MFDC) berendezések mellett a mikrohegesztésre jellemzőek

- áramforrása: nagyfrekvenciás egyenáramú (HFDC), ill. tranzistoros egyenáramú
- elektródaerő biztosítása: rugóterheléssel, ill. elektromágnessel

Az szabályozási módok közül – a jól ismert állandó áramú, amely sík érintkezésű jól vezető anyagokra jellemző (65%) – szerepet kapott [6] az:

- állandó feszültségű, amely olyan alkalmazásokhoz használható, ahol a munkadaraboknak nincs sík felülete, pl. keresztvezetékvezetékek, és ahol az ellenállás jelentősen változik, valamint rendkívül rövid hegesztéseknél (kevesebb, mint 1 ms)
- állandó teljesítményű olyan alkalmazásokhoz, ahol az elektromos ellenállás jelentős eltéréseket mutat hegesztésként, beleértve azokat az alkalmazásokat is, ahol a bevonat erodálódik és felhalmozódik a hegesztőelektródák felületén

A fentiek alapján belátható, hogy az ellenállás-mikrohegesztésnél jól használható egy olyan nagyfrekvenciás, esetleg kondenzátorkisüléssel egyenáramú rendszer, amely magas szinten képes a minőség biztosítására, mindezt energiatakarékosabban. Széleskörű programozhatóságuk, kis transzformátorméretük és robusztusságuk miatt a nagyfrekvenciás inverteres tápegységek általában a legjobb választás az automatizálási alkalmazásokhoz is. A következő fejezet egy ilyennek az ismertetése.

### 3. HWH-iSpotHFG nagyfrekvenciás hegesztőrendszer

#### 3.1 Leírása

Az iSpot (1. ábra) egy korszerű kezelőfelülettel rendelkező kisméretű – akár hordozható – hegesztésvezérlő, amely könnyen és ösztönös megérzéssel, élményszerűen használható kis alkatrészek ellenállás-hegesztéséhez és -forrasztásához. Megjegyezzük, hogy a gyártó termékválasztékából ez több különböző mikrohegesztéshez alkalmas típuscsoport egyike [7].



1. ábra

HWH iSpotHFG nagyfrekvenciás hegesztő

A négy teljesítménymagyságra elérhető készülék kézi munkaállomásokhoz és félautomata rendszerekhez ideális. Minden alkalmazási területen az áram, feszültség, teljesítmény vagy hőmérséklet értékeinek digitális szabályozása szavatolja a reprodukálható és biztonságos folyamatot a használható eljárásoknál, amelyek:

- ponthegesztés
- dudorhegesztés
- keresztirányú hegesztés
- vonalhegesztés
- réshegesztés

- ellenállás lágyforrasztás
- újraolvasztásos lágyforrasztás (bar soldering)

A kompakt asztali készüléknek (2. ábra) beépített transzformátora van és választható hőmérséklet-szabályozással a forrasztási funkcióhoz.



2. ábra

Kézi munkaállomás

### 3.2 Tulajdonságai

Az éppen hordozhatóságnak megfelelő tömege mellett fontos tulajdonsága, hogy a több eljárásra való alkalmassága mellett számos folyamatváltozót lehet igen egyszerűen és szemléletesen – hála a nagyfrekvenciának – nagyon pontosan beállítani, messzemenően figyelembe véve a megismételhetőséget:

- nagy vezérlési sebesség (10 vagy 15 kHz)
- áram-, feszültség- vagy teljesítményszabályozás
- kondenzátorkisülési üzemmód (teljesítményszabályozással)
- forrasztási üzemmód (hőmérsékletszabályozással)
- különböző kezelési képernyők
- grafikus kijelző érintőképernyővel
- kompakt kialakítás (asztali készülék)
- áram, feszültség, teljesítmény, ellenállás és hőmérséklet elemzése
- számítógépes szoftver a kezeléshez és adattároláshoz
- felhasználó engedélyezése PIN-kóddal

### 3.3 Főbb műszaki adatok

A készülék azonos méretű házban jelenleg négy áramtartományban készül, léghűtéssel, ill. a nagyobbak vízhűtéssel (is). Választható a feszültségmérés kialakítása, mivel azt az elektrodaegységhez kell csatlakoztatni. Ugyancsak választható, hogy tartalmazza-e a forrasztáshoz és/vagy előmelegítéshez, hőkezeléshez szükséges hőmérsékletszabályozást különböző típusú érzékelőkkel.

Az előző fejezetben részletezett ellenállás-mikrohegesztési áttekintés adataival nem készítettünk összehasonlítást, mert fontosabbnak tartjuk, hogy az érdeklődők, vagy az eljárásokat ismerők ezeket a saját tapasztalataikkal vessék egybe.

Típus:	iSpotHFG-05	-10	-40	-80
Beállítási tartomány:	0,0005 – 0,5 kA			0,1 – 8 kA
Táphálózat:	400 V, 50 Hz, 3 x 16 A			3 x 25 A
Inverterfrekvencia:	15 kHz			10 kHz
Hegesztések száma:	60 h./perc			120 h./perc
Hűtés:	levegő			víz
Méret (H/Sz/M):	470 x 220 x 270 mm			ua.
Tömeg:	14 kg			16,5 kg

A közbenső két típus adatai értelemszerűen szintén közbensőek, alap kivételben léghűtésűek, a típusszám a legnagyobb áramerősség tízszeresére utal.

## 4. Összefoglalás

Ennek a nagyfrekvenciás tápegységnek véleményünk szerint a legnagyobb előnye, hogy meglévő ellenállás-mikrohegesztőállomásokat – amelyeknek a hegesztőfeje jó állapotban működőképes – igen egyszerűen, gyorsan, saját kivételben, külső erőforrások nélkül lehet a legkorszerűbbé változtatni. További lehetőség, hogy ahol a hegesztőfejeket építőelemekből rakják össze vagy gépesített gyártócellákat készítenek, különösen automata kiszolgálással, ezt a rendszert egyszerűen integrálhatják. Kiemelten nagy előnye az egyszerű beállíthatósága, a letisztult jól értelmezhető érintőképernyős – az adott feladathoz alkalmazkodó – kezelőfelület. Elérkezettnek látjuk az időt az aggodalom nélküli váltásra, hiszen aki megismerkedett már ezzel a készülékkel – pl. a Mach-Tech 2022 kiállításon – az bizonyíthatja, hogy a lényegesen több tudás és lehetőség mellett a kezelése egyszerűbb, mint a korábbi konstrukciójú készülékeké.

Végezetül ami talán a legmúltóbb a figyelemre, hogy az adott munkafeladathoz, eljáráshoz jól megfelelő szabályozási módokkal – állandó áramú, -feszültségű, -teljesítményű – rendelkezhetünk, a kondenzátorkisülési üzemmódban is teljesítményszabályozással. A folyamatba illesztett hőkezelésekhez vagy forrasztáshoz hőmérséklet-idő profilokat állíthatunk be, hiszen a hőmérséklet szabályozás lehetővé teszi, hogy a „megfoghatatlan” áramerősségbeállítás helyett pontos előmelegítési, utóhőkezelési vagy forrasztási hőmérsékletekkel dolgozzunk.

## Irodalomjegyzék

- [1] Dobránszky János: Mikrohegesztések, Hegesztéstechnika, XVI. évfolyam 2005/2, pp. 17-19
- [2] MSZ EN ISO 4063:2016 – Hegesztés és rokon eljárások, A hegesztési eljárások megnevezése és azonosító számuk
- [3] B. H. Chang, M. V. Li & Y. Zhou: Comparative study of small scale and 'large scale' resistance spot welding, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, Issue 5 (2001), pp. 273-280
- [4] Merkblatt DVS 2950, April 2010 – Widerstandsschweißen in der Elektronik und Feinwerktechnik – Übersicht und Grundlagen – DIN-DVS-Taschenbuch 312/1, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2010, pp. 565-576
- [5] Németh Alexandra: Ellenállás-hegesztés szimulációja és optimalizálása Sorpas szoftver segítségével, MHE Online, Hegesztési Felelősök XXII. Országos Tanácskozása, 2021.09.09.
- [6] Fundamentals of Small Parts Resistance Welding, Miyachi Unitek Corporation, Monrovia – CA, 2006, pp. 1-5
- [7] Schweißsystem iSpotHFG, 38847-01de, Betriebsanleitung, Harms + Wende GmbH & Co. KG, Hamburg, 2017-06

# MICROSTRUCTURE AND CORROSION PROPERTIES OF AUSTENITIC AND DUPLEX STAINLESS DISSIMILAR JOINTS

## AUSZTENITES ÉS DUPLEX ROZSDAMENTES ACÉLOK VEGYES KÖTÉSEINEK MIKROSZERKEZETI ÉS KORRÓZIÓS TULAJDONSÁGAI

### Balázs VARBAI

BME Department of Materials Science and Engineering, 1111 Budapest, Műegyetem rkp 3., Hungary

[varbai.balazs@gpk.bme.hu](mailto:varbai.balazs@gpk.bme.hu)

### Patrik BOLYHOS

BME Department of Materials Science and Engineering, 1111 Budapest, Műegyetem rkp 3., Hungary

[bolyhos.patrik@gmail.com](mailto:bolyhos.patrik@gmail.com)

### Dávid Miklós KEMÉNY

BME Department of Materials Science and Engineering, 1111 Budapest, Műegyetem rkp 3., Hungary

[kemenyd@eik.bme.hu](mailto:kemenyd@eik.bme.hu)

### Kornél MÁJLINGER

BME Department of Materials Science and Engineering, 1111 Budapest, Műegyetem rkp 3., Hungary

[welding@att.bme.hu](mailto:welding@att.bme.hu)

*In several applications duplex stainless steels should be joint welded to conventional austenitic stainless steels. In our research we welded LDX 2101 lean duplex stainless sheets to conventional 304 austenitic stainless steels, using gas tungsten arc welding (GTAW). For the welded joints we used three different welding rods: ER 308L, ER 309LSi, and ER 2209. Good correlation was found between the measured alloying content in the weld metal and the estimated alloying content. The best pitting corrosion resistance was resulted in using the 308L welding rod and argon shielding gas.*

*Számos alkalmazásban duplex korrózióálló acélokat kell hagyományos ausztenites acélokhoz kötni. Kutatásunk során LDX 2101 típusú sovány duplex és 304 típusú hagyományos ausztenites acélt hegesztettünk össze volfrámelektrodás védőgázos ívhegesztési eljárással. A hegesztett kötések létrehozásához három különböző pálcát használtunk: ER 308L, ER 309LSi és ER 2209. Jó egyezést találtunk a varratok mért kémiai összetétele és a becsült összetétel között. A legjobb lyukkorróziós ellenállást az ER 308L pálcá alkalmazásakor mértük argon védőgáz alkalmazása mellett.*

## 1. Introduction

Duplex stainless steels have great strength ( $R_{p0.2} \approx 500$  MPa) and excellent corrosion resistance against stress corrosion cracking [1]–[4]. Thus, the application of duplex stainless steels in civil engineering, chemical, oil and gas industries are constantly growing [5]–[7]. Among duplex stainless steels the low nickel and molybdenum bearing lean duplex grades show the similar corrosion resistance as the conventional austenitic grades, however providing a much a higher strength and a lower price [8]. In several applications duplex and lean duplex stainless steels should be joint welded to conventional austenitic stainless steels with higher nickel and lower chromium contents [9], [10]. The different chemical compositions result in different corrosion resistance and mechanical properties [11], [12]. The welding consumable selection determines the governing properties of the welds. Thus, designing the welded joints, joint preparations, dilution, etc. is essential in dissimilar joints between different stainless steels. For the design of dissimilar joints constitutional diagrams such as the Schaeffler-diagram can be used [13]. These diagrams show the governing microstructure in the weld metal according to the ferrite promoting elements (chromium equivalent, CrE) and the austenite promoting elements (nickel equivalent, NiE). Several constitutional diagrams exist, with different CrE and NiE calculation methods, however they do not calculate with the welding parameters, such as the shielding gas, which can have a great influence on the microstructure. It is known that the nitrogen containing shielding gas in gas tungsten arc welding (GTAW) can promote austenite formation, thus small amount (2 %) of nitrogen



addition to the shielding gas is recommended [14]. In our research, we investigated the dissimilar joints in-between LDX 2101 lean duplex and 304 austenitic stainless steels. The joints were welded by GTAW using 3 different suitable welding rods and pure (4.6) argon and argon + 2 % nitrogen gas mixtures. The joints were evaluated by metallographic techniques and corrosion tests.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Base Materials and Welding Consumables

For the GTAW dissimilar joint experiments X2CrMnNiN21–5–1 (LDX 2101) lean duplex stainless steel sheet in 2 mm thickness, and X5CrNi18–10 (304) austenitic stainless steel sheet in 3 mm thickness were GTA welded together. The chemical compositions of the base materials can be seen in Table 1. For the dissimilar joints three different welding rods were used: W 19 9 L (ER 308L), W 23 12 L Si (ER 309LSi), and W 22 9 3 N L (ER 2209). For GTAW of duplex stainless steels nitrogen containing gas mixtures are recommended, thus argon and argon + 2 % nitrogen shielding gases were used.

Table 1. The chemical composition (in weight %) of the base materials, according to their data sheet.

Base material	Cr	Ni	Mo	N	Cu	C	Mn
LDX 2101	21.5	1.5	0.3	0.22	0.3	0.03	5
304	18.3	8.6	0.2	-	0.4	0.05	1.8

### 2.2 Welding Parameters

The applied welding parameters can be seen in Table 2. In Table 2. arc energy (thermal efficiency is considered as 1.0) is presented instead of heat input as we used different shielding gases with different physical properties. The arc energy remained constant ~0.6 kJ/mm in every case. The shielding gas flow rate was 9 L/min, the argon backing gas flow rate was 5 L/min in every case. The length of the welds was 110 mm. The used polarity for the GTAW was DC-. The GTAW was done manually, thus the welding parameters presented in Table 2. are average values for each welding run.

Table 2. The welding parameters used for the dissimilar joint experiments.

Welding consumable	Shielding gas	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Arc energy (kJ/mm)
ER 2209	Ar	57	12	7.1	0.58
ER 308L	Ar	57	11.5	6.9	0.57
ER 309LSi	Ar	57	12	7	0.59
ER 2209	Ar + 2 % N <sub>2</sub>	57	13	7.2	0.62
ER 308L	Ar + 2 % N <sub>2</sub>	57	13	7.1	0.60
ER 309LSi	Ar + 2 % N <sub>2</sub>	57	13	7.3	0.61

### 2.3 Microstructure Evaluation

The microstructural evaluation was done using standard metallographic specimens. The specimens were cut from the cross-section and mounted into metallographic resin. The mounted samples were grinded up to 4000 grit paper and then polished with 3 μm diamond suspension. To reveal the dissimilar microstructure two different types of etchants were used. For the lean duplex side Beraha-type etchant: 60 ml H<sub>2</sub>O + 20 ml HCl + 0.5 g K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> was used for 5 seconds. For the austenitic side Kalling-type etchant: 20 ml C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH + 40 ml HCl + 2 g CuCl<sub>2</sub> was used for 25 seconds. For every etching sequence the Kalling-type etchant was used first. The ferrite content of the weld metal was measured using Fischer FMP30 ferriscope. The chemical composition of the weld metal was measured by SEM EDS technique with Zeiss EVO MA10 electron microscope with EDAX system. The dilution ratio was measured on the metallographic specimens, using Olympus SZX16 stereo microscope. The microstructural images were obtained by Olympus PMG3 optical microscope.

## 2.4 Prediction Methods Using Constitutional Diagrams

For the prediction of the weld metal chemical composition and ferrite content two different constitutional diagrams were used. The Schaeffler-diagram (S) [13] is the conventional constitutional diagram used for the prediction of stainless steel weld metals, which was a bit modified by the stainless steel manufacturer Outokumpu (O) [15]. The CrE and NiE values according to the constitutional diagrams (S and O) were calculated as:

$$\text{CrE (S)} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1.5 \times \text{Si} + 0.5 \times \text{Nb} \quad (1)$$

$$\text{NiE (S)} = \text{Ni} + 30 \times \text{C} + 0.5 \times \text{Mn} \quad (2)$$

$$\text{CrE (O)} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1.5 \times \text{Si} + 0.5 \times \text{Nb} \quad (3)$$

$$\text{NiE (O)} = \text{Ni} + 30 \times (\text{C} + \text{N}) + 0.5 \times \text{Mn} \quad (4)$$

The chemical composition of the weld metal ( $X_{WM}$ ) was predicted by the following equation:

$$X_{WM} = D_{2101} \times X_{2101} + D_{304} \times X_{304} + D_{cons} \times X_{cons} \quad (5)$$

where D are the dilutions of the base materials and the consumable and X is the given chemical element in the base material and the welding consumable.

## 2.5 Corrosion Test

The welded sheets were first cut to 25 × 50 mm specimens, which were cleaned, pickled and passivated before the corrosion test, using Polinox P Rapid pickling paste for 15 minutes. The weights of the specimens were measured before and after 24 hours of corrosion test in 6 % FeCl<sub>3</sub> solution by Denver Instrument APX-200 with 0.1 mg accuracy. The corrosion type was also evaluated by stereo microscopic techniques.

# 3. Results and Discussion

## 3.1 Weld Metal Microstructure

The etched metallographic images can be seen in Figure 1. The ER 2209 duplex stainless steel welding rod resulted in more ferritic microstructure (darker areas) using both shielding gases. The ER 308LSi austenitic stainless steel rod and higher Cr- and Ni-containing ER 309LSi rod (recommended mostly for dissimilar welds) resulted in more austenitic microstructure. It can be also seen on the microstructural images that the nitrogen addition to the shielding gas highly promoted austenite formation in the weld metal in all cases, but most significantly in the case of ER 308LSi rod.

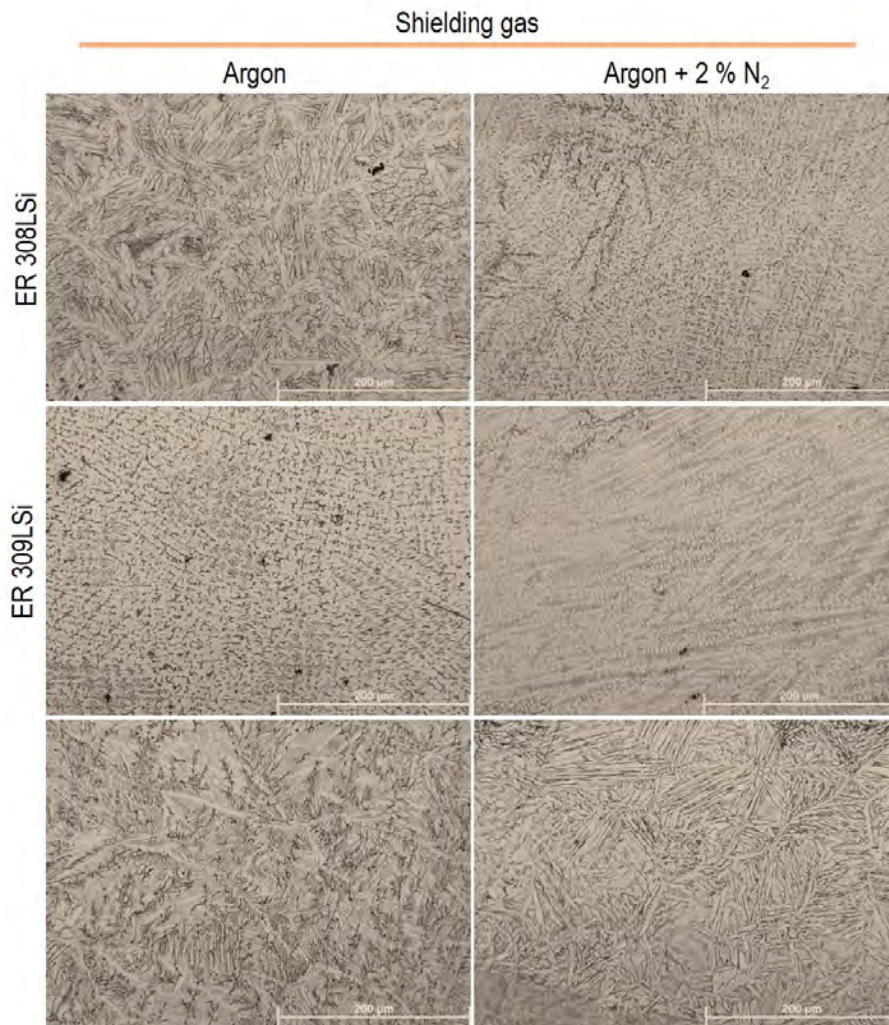


Figure 1.

The weld metal microstructures resulted by the different shielding gases and welding consumables. The darker area is the ferrite phase the lighter is the austenite.

### 3.2 Evaluation of the predictive diagrams

The dilution ratios were calculated on the cross-sections of the welded joints. One example for the calculation can be seen in Figure 2, showing the ER 308LSi welded dissimilar joint, using Ar + 2 % N<sub>2</sub> shielding gas.

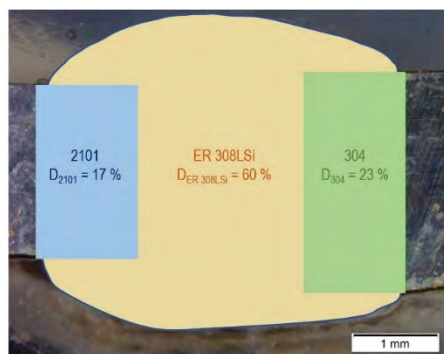


Figure 2.

The estimating calculation of the dilution ratio on the cross-section of the ER 308LSi, Ar + 2 % N<sub>2</sub> welded joint. 2 mm root gap was kept during GTA welding.

The dilution results can be seen in Table 3.

Table 3. The different dilutions measured on the cross-sections of the welded joints.

	Dilution (%)		
	D <sub>2101</sub>	D <sub>304</sub>	D <sub>ER 308LSi</sub>
Ar	20	20	60
Ar + 2 % N <sub>2</sub>	17	23	60
	D <sub>2101</sub>	D <sub>304</sub>	D <sub>ER 309LSi</sub>
Ar	25	20	55
Ar + 2 % N <sub>2</sub>	21	26	53
	D <sub>2101</sub>	D <sub>304</sub>	D <sub>ER 2209</sub>
Ar	17	20	63
Ar + 2 % N <sub>2</sub>	21	27	52

The welding consumable gave ~ 50-60 % of the weld metal according to the measurements of the cross-sections. Some variations are measured, which is originated from the manual welding. Also, the shielding gas composition seems to influence the dilutions, as the properties of the arc plasma and thermal efficiency also differs. For the calculations of the chemical compositions and the ferrite contents the dilution rates were used in equation (5). The comparison of the measured and estimated ferrite content of the weld metal can be seen in Table 4.

Table 4. The comparison of the measured and estimated ferrite contents in the weld metal.

Consumable	Shielding gas	Ferrite (%) Measured	Ferrite (%) Schaeffler	Ferrite (%) Outokumpu
ER 308LSi	Ar	15 ± 2	16	15
	Ar + 2 % N <sub>2</sub>	9 ± 3	15	13
ER 309LSi	Ar	12 ± 1	16	13
	Ar + 2 % N <sub>2</sub>	10 ± 3	14	12
ER 2209	Ar	31 ± 3	58	30
	Ar + 2 % N <sub>2</sub>	29 ± 5	50	27

In Table 4. it is visible the nitrogen addition to the shielding gas has an austenite promoting effect. It is also confirmed that the most significant influence of nitrogen was measured in the weld made by ER 308LSi welding rod, which is also visible in Figure 1. The ER 2209 welding wire resulted in a duplex weld metal, as the measured ferrite contents are ~30%. Comparing the constitutional diagrams, the Outokumpu-diagram is giving much closer estimation to the measured ferrite contents. The reason for this is that in the NiE(O) (equation 4) nitrogen also presents as a strong austenite former, and the Outokumpu-diagram thus modified to the modern nitrogen alloyed lean duplex stainless steel grades, compared to the original Schaeffler-diagram, which was first published in 1949.

Table 5. The comparison of the measured (EDS) and estimated (S – Schaeffler) chemical compositions of the weld metal.

Consumable	Shielding gas	Chemical composition of the weld metal (%)							
		Cr		Ni		Mn		Mo	
		EDS	S	EDS	S	EDS	S	EDS	S
ER 308LSi	Ar	22,7	19,4	6,7	7,7	1,5	2,4	0,7	0,1
	Ar + 2 N <sub>2</sub>	29,2	19,2	9,4	7,9	1,6	2,3	0,3	0,1
ER 309LSi	Ar	24,7	21,8	8,9	9,7	1,3	2,7	0,6	0,2
	Ar + 2 N <sub>2</sub>	22,1	21,5	7,3	9,9	1,1	2,5	0,5	0,2
ER 2209	Ar	24	21,9	7,1	7,1	0,7	2,1	2	2,2
	Ar + 2 N <sub>2</sub>	24,1	21,5	7,8	6,9	1,1	2,3	1,6	1,9

The comparison of the measured and estimated chemical composition of the weld metal can be seen in Table 5. With SEM EDS only Cr, Ni, Mn, and Mo content could be measured, thus only these elements are compared. For the comparison, only the Schaeffler-diagram was used. From Table 5. it is visible the Schaeffler-diagram always underestimated the Cr-content and always overestimated the Mn-contents. The best estimation was resulted in case of the ER 2209 welding rod. Also, as the shielding gas has an influence on the arc properties, thermal efficiency and thus the dilutions, differences could be measured

in the weld metal chemical compositions as a function of the shielding gas. The highest errors can be seen in the Mo- and Mn-contents, but the Cr- and Ni-contents show fairly good correlation (highest error is 15 % in ER 308 LSi, Ar), taking into attention that, the Schaeffler-diagram does not calculate with the welding parameters.

### 3.3 Corrosion resistance

The surface of the face side of the argon shielding gas welded samples after the 24 hours corrosion test can be seen in Figure 3, where the left side to the weld is always the 2101 base material and the right side is the 304.

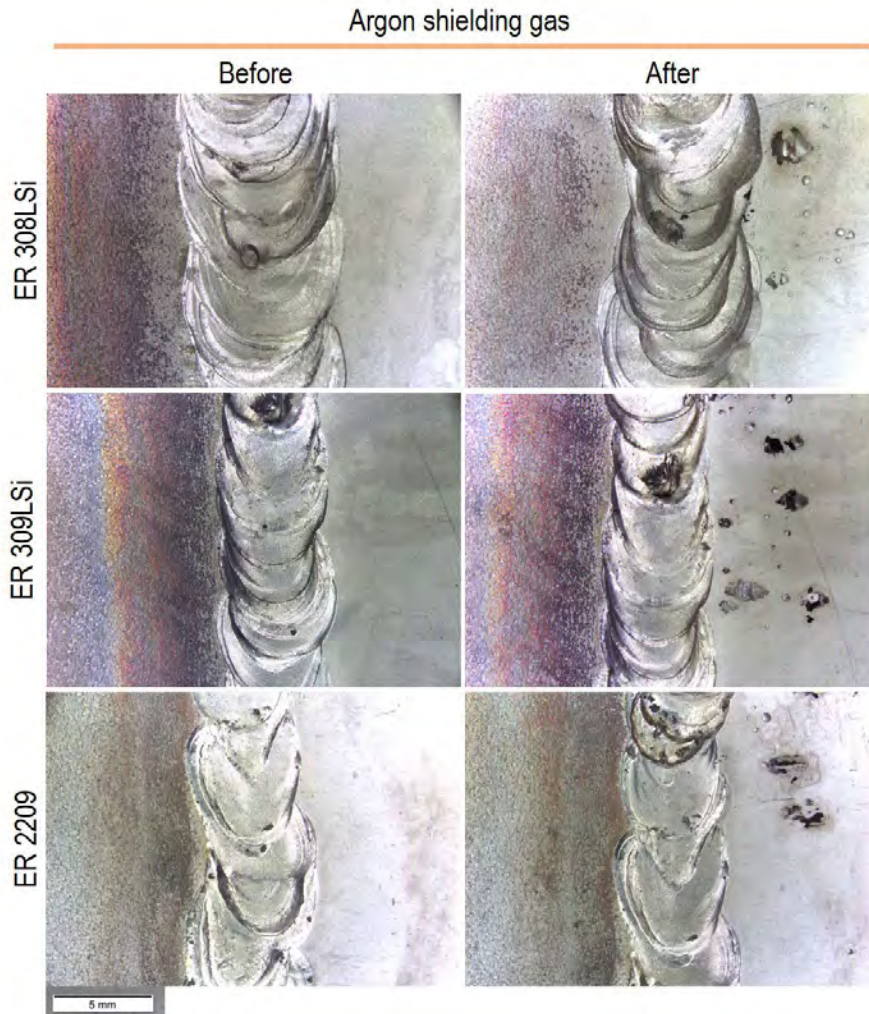


Figure 3.

The surface of the face side before and after the 24h corrosion test of the argon welded samples. Left side of the weld: 2101 base material, right side: 304.

In Figure 3. it is visible pitting corrosion occurred after 24 hours on the austenitic 304 side in all cases. This is due to the lower chromium of the austenitic grade compared to the 2101 lean duplex stainless steel and compared to the used three welding consumable. This type of corrosion mechanism is representative also to the samples welded with argon + 2 % nitrogen shielding gas. The weight loss of the specimens in percentages after the 24h corrosion test can be seen in Figure 4. The samples had fairly the same weight loss, the difference between the highest and lowest corrosion rate is only 1 %. The reason for this is that, the pitting corrosion initiated at the 304 austenitic side in the base material, and the corrosion developed in these pitting sites. Thus, the welding consumable and the used shielding gas has a low influence on the corrosion resistance in this case. Also, the joints were welded with roughly the same arc energy, thus the heat cycle influence on the heat affected zone is also the same.

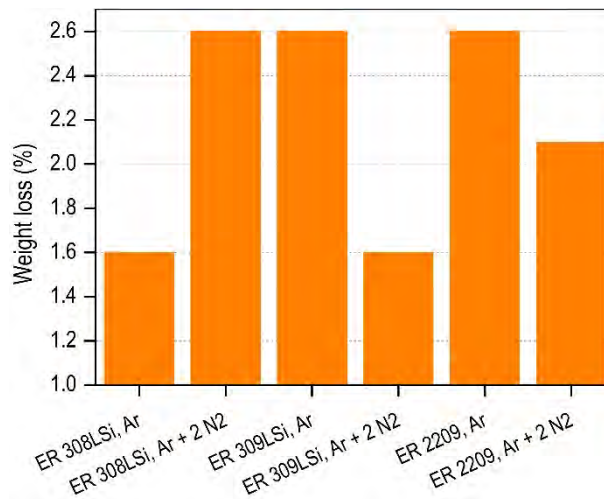


Figure 4.

The weight loss of the specimens in percentages after the 24h corrosion test.

## 4. Conclusions

In our research we investigated dissimilar 2101 lean duplex (X2CrMnNiN21–5–1) – 304 austenitic (X5CrNi18–10) stainless steel joints. The welds were made by gas tungsten arc welding, using three different welding rods: W 19 9 L (ER 308L), W 23 12 L Si (ER 309LSi), and W 22 9 3 N L (ER 2209), and two different shielding gases: argon and argon + 2 % nitrogen. It was found constitutional diagrams can be used to predict the weld metal ferrite content and chemical composition with good correlation. It was also found the pitting corrosion initiated on the 304 base material side in all cases during the 24 hours immersion test, thus the welding consumable and the shielding gas had no influence on the corrosion resistance of the welded joints in the case of the investigated corrosion test.

## Acknowledgement

This paper has been supported by the National Research, Development and Innovation Office – NKFIH, OTKA PD 138729.

## Irodalomjegyzék

- [1] C. R. de Farias Azevedo, H. Boschetti Pereira, S. Wolyneć, and A. F. Padilha, "An overview of the recurrent failures of duplex stainless steels," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 97, no. October 2018, pp. 161–188, Mar. 2019.
- [2] A. Świerczyńska, D. Fydrych, M. Landowski, G. Rogalski, and J. Łabanowski, "Hydrogen embrittlement of X2CrNiMoCuN25-6-3 super duplex stainless steel welded joints under cathodic protection," *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117697, Mar. 2020.
- [3] T. Berecz, É. Fazakas, E. R. Fábíán, P. Jenei, and J. E. Maróti, "Investigation of Thermally Induced Deterioration Processes in Cold Worked SAF 2507 Type Duplex Stainless Steel by DTA," *Crystals*, vol. 10, no. 10, p. 937, Oct. 2020.
- [4] I. Mészáros, B. Bögre, and P. J. Szabó, "Magnetic and Thermoelectric Detection of Sigma Phase in 2507 Duplex Stainless Steel," *Crystals*, vol. 12, no. 4, p. 527, Apr. 2022.
- [5] A. I. Nagy, E. R. Fábíán, R. Horváth, and P. Terek, "Difficulties in the Machining Super Duplex Stainless Steels," *Műszaki Tudományos Közlemények*, vol. 11, no. 1, pp. 141–144, Oct. 2019.
- [6] J. Olsson and M. Snis, "Duplex - A new generation of stainless steels for desalination plants," *Desalination*, vol. 205,

- no. 1–3, pp. 104–113, 2007.
- [7] P. Boillot and J. Peultier, "Use of stainless steels in the industry: recent and future developments," *Procedia Eng.*, vol. 83, pp. 309–321, 2014.
- [8] G. Rogalski, A. Świerczyńska, D. Fydrych, and M. Landowski, "The influence of solution annealing temperature on the properties of Lean Duplex 2101 welded joints in tubes," *Weld. Technol. Rev.*, vol. 91, no. 4, pp. 49–59, Jun. 2019.
- [9] M. Landowski, A. Świerczyńska, G. Rogalski, and D. Fydrych, "Autogenous Fiber Laser Welding of 316L Austenitic and 2304 Lean Duplex Stainless Steels," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 13, p. 2930, Jun. 2020.
- [10] J. Dobránszky, Z. Lőrinc, F. Gyimesi, A. Szigethy, and E. Bitay, "Laser welding of lean duplex stainless steels and their dissimilar joints," 2015.
- [11] D. M. Kemény and D. Kovács, "The Effect of Welding Parameters on the Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steel," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 66, no. 2, pp. 151–157, Mar. 2022.
- [12] D. Kovács and J. Dobránszky, "Effects of Thermochemical Surface Treatments on the Industrially Important Properties of X2CrNiMo 17-12-2 Austenitic Stainless Steel," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 63, no. 3, pp. 214–219, May 2019.
- [13] A. L. Schaeffler, "Constitutional Diagram for Stainless Steel Weld Metal," *Met. Prog.*, vol. 56, pp. 680-680B, 1949.
- [14] S. Hertzman, "The influence of nitrogen on microstructure and properties of highly alloyed stainless steel welds," *Isij Int.*, vol. 41, no. 6, pp. 580–589, 2001.
- [15] Outokumpu, *Handbook of Stainless Steel*. Avesta: Outokumpu Oyj, 2013.