

Varbai Balázs <sup>1\*</sup>, Bolyhos Patrik <sup>1</sup>, Breznay Csaba <sup>1</sup>

# Auszténites és duplex korrózióálló acélok vegyes kötéseinek mikroszerkezeti és korróziós tulajdonságai

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar,  
Budapest, Magyarország 1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3.  
\* varbai.balazs@gpk.bme.hu

## Abstract

*There are many industrial applications where duplex stainless steels need to be welded to austenitic stainless steels. In our research, we have welded LDX 2101 type lean duplex and 304 type conventional austenitic steels using a gas tungsten arc welding process. Three different rods: ER 308LSi, ER 309LSi and ER 2209 and two different shielding gases: argon, argon + 2% nitrogen were used to make the welded joints. As a result, the chemical composition of the weld metals was found to be in good agreement with the values estimated by the constitutional diagrams. The best resistance to pitting corrosion was obtained with ER 308LSi filler metal using argon shielding gas.*

## Key words:

*duplex stainless steel, dissimilar joint, corrosion, estimation of ferrite content, austenitic stainless steel*

## Absztrakt

*Számos olyan ipari alkalmazás létezik, mikor duplex korrózióálló acélokat kell auszténites acélokhöz kötni. Kutatásunk során LDX 2101 típusú sovány duplex és 304 típusú hagyományos auszténites acélt hegesztettünk össze volfrámelektrodás védőgázos ívhegesztési eljárással. A hegesztett kötések létrehozásához három különböző pálcát: ER 308LSi, ER 309LSi és ER 2209, és két különböző védőgázt: argon, argon + 2% nitrogén használtunk. Eredményként azt találtuk, hogy a varratfémek kémiai összetétele jó egyezést mutat az egyezményes diagramok által becsült értékekkel. A legjobb lyukkorrózióval szembeni ellenállást az ER 308LSi hozaganyaggal készített varrat mutatta, argon védőgáz alkalmazása mellett.*

## Kulcsszavak:

*duplex korrózióálló acél, vegyes kötés, korrózió, ferrittartalom becslése, auszténites korrózióálló acél*

## 1. Bevezetés

A duplex rozsdamentes acélok nagy szilárdsággal (folyáshatáruk  $R_{p0,2} \approx 500$  MPa) és kiváló korrózióállósággal bírnak, különösen a feszültségi korrózióval szemben [1-5]. Emiatt alkalmazási területük az építőiparban, a vegyiparban, valamint az olaj- és a gáziparban folyamatosan növekszik [6-9]. A duplex rozsdamentes acélok (DSS) közül a kis nikkel- (Ni) és molibdéntartalmú (Mo) sovány duplex minőségek hasonló korrózióállóságot mutatnak, mint a hagyományos auszténites acélok. Emellett szilárdságuk nagyjából kétszerese az auszténites acélokénak, valamint a kis Ni- és Mo-tartalom miatt az áruk is kedvezőbb [10]. Számos ipari alkalma-

zásnál a duplex és a sovány duplex rozsdamentes acélokat a nagyobb Ni- és krómtartalmú (Cr) auszténites rozsdamentes acélokhöz kell hegesztetni [11, 12]. Az eltérő kémiai összetétel eltérő korrózióállóságot és mechanikai tulajdonságokat eredményez a varratfémekben [13, 14]. Az alkalmazott hegesztőanyag, hegesztési eljárás és élélőkészítés befolyásolja a varratfém hígulási arányát (az alapanyagok és a hegesztőanyag keveredését), ezért a varratfém tulajdonságai jelentősen eltérhetnek az alapanyagokétól. Az operatív hegeszthetőség szempontjából nagy jelentőségű, hogy az auszténites és a duplex rozsdamentes acélok eltérő fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, ami ívvándorlást, vagy a mara-

dó feszültségek hatására vetemedést eredményezhet, mivel az auszténites acélok hőtágulási tényezője nagyobb ( $\sim 16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), mint a duplex acéloké ( $\sim 13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ).

A varratfém irányadó tulajdonságait a hegesztőanyag kiválasztása határozza meg. Ezért a különböző rozsdamentes acélok vegyes kötéseinek létrehozásához elengedhetetlen az élélőkészítés, a hegesztőanyag, a hegesztési eljárás, a hígulási arány stb. gondos megválasztása. A vegyes kötések varratfémének tervezéséhez egyezményes diagramok állnak rendelkezésre, mint például a Schaeffler-diagram [15]. Ezek a diagramok a kialakult varratfém mikroszerkezetének összetételét mutatják a ferritképző elemek (krómgyenér-

ték, CrE) és az auszteni képző elemek (nikkelegyenérték, NiE) függvényében. Számos egyezményes diagram létezik, különböző CrE és NiE számítási módszerekkel, azonban ezek nem számolnak olyan lényeges hegesztési változókkal, mint például a védőgáz összetétel, ami nagy hatással lehet a kialakuló mikroszerkezetre. Ismert, hogy volfrámelektrodás, védőgázos ívhegesztés (TIG-hegesztés) esetén a nitrogéntartalmú védőgáz elősegíti az auszteni képződését, ezért a védőgázhoz kis mennyiségű (2%) nitrogén hozzáadása javasolt [16]. A jelenlegi kutatásunk során LDX 2101-es sovány duplex és 304-es auszteni rozsdamentes acélok közötti vegyes kötéseket vizsgáltunk. A varratokat TIG-hegesztési eljárással készítettük, három különböző hegesztőpálcával, tiszta (4.6) argon és argon + 2% nitrogén tartalmú gázkeverékekkel. A kötéseket metallográfiai vizsgálatokkal és korróziós mérésekkel értékeltük.

## 2. Anyagok és kísérleti módszerek

### 2.1 Az alap- és a hozaganyagok bemutatása

A hegesztési kísérletekhez X2CrMnNiN21-5-1 (LDX 2101) sovány duplex rozsdamentes acéllemez 2 mm vastagságban és 100 × 50 mm méretben, és X5CrNi18-10 (AISI 304) auszteni rozsdamentes acéllemez 3 mm vastagságban és 100 × 40 mm méretben használtunk. Az alapanyagok kémiai összetétele az 1. táblázatban, a mechanikai tulajdonságai a 2. táblázatban láthatók. A vegyes kötésekhez három különböző hegesztőpálcát használtunk: W 19 9 L Si (ER 308LSi), W 23 12 L Si (ER 309LSi), és W 22 9 3 N L (ER 2209). A hegesztőpálcák jelölésénél a számok a Cr, Ni és Mo tömegszázalékára vonatkoznak. A duplex acélok TIG-hegesztéséhez nitrogéntartal-

1. táblázat

Az alapanyagok és a hozaganyagok kémiai összetétele a gyártói adatlapjuk alapján

Alapanyag/ Hozaganyag	Kémiai összetétel (tömeg %)							
	Cr	Ni	Mo	N	Cu	C	Mn	Si
LDX 2101	21,5	1,5	0,3	0,22	0,3	0,03	5	-
AISI 304	18,3	8,6	0,2	-	0,4	0,005	1,8	0,4
ER 308LSi	19,0	9,5	-	-	-	0,02	1,8	0,9
ER 309LSi	23,1	13,8	0,1	0,06	0,05	0,01	1,9	0,7
ER 2209	23,2	8,2	3,4	0,13	0,07	0,01	1,4	0,5

2. táblázat Az alapanyagok mechanikai tulajdonságai a gyártói adatlapjuk alapján

Alapanyag	Mechanikai tulajdonság (minimum)		
	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)
LDX 2101	530	700	30
AISI 304	230	540	45

3. táblázat

A vegyes kötések kísérletekhez használt hegesztési változók

Hozaganyag	Védőgáz	Hegesztőáram (A)	Feszültség (V)	Haladási sebesség (cm/perc)	Ívenergia (kJ/mm)
2209	Ar	57	12	7,1	0,58
308LSi	Ar	57	11,5	6,9	0,57
309LSi	Ar	57	12	7	0,59
2209	Ar+2% N <sub>2</sub>	57	13	7,2	0,62
308LSi	Ar+2% N <sub>2</sub>	57	13	7,1	0,60
309LSi	Ar+2% N <sub>2</sub>	57	13	7,3	0,61

mú gázkeverékek javasoltak [16, 17], így argon és argon + 2% nitrogén védőgázokat is használtunk a kísérleteink során.

### 2.2 Az alkalmazott hegesztési változók

Az alkalmazott hegesztési változók a 3. táblázatban láthatók. A 3. táblázatban a hőbevitel helyett az ívenergiát tüntettük fel (termikus hatásfokot 1,0-nek tekintjük), mivel különböző védőgázokat használtunk, eltérő fizikai tulajdonságokkal, ami befolyásolja a termikus hatásfok értékét. Az ívenergiát minden esetben ~0,6 kJ/mm állandó értéken tartottuk. A védőgáz áramlási sebessége 9 l/perc, az argon gyökvédőgáz áramlási sebessége 5 l/perc volt, minden esetben. A hegesztési varratok hossza 110 mm volt. A TIG-hegesztést egyenáram, elektróda (WC20) negatív polaritással végeztük manuálisan, így a 3. táblázatban

bemutatott hegesztési paraméterek hegesztésenkénti átlagértékek. A 2 mm-es gyökhezag megtartása mellett a hegesztés során nem használtunk leélezést (tompá I-varrat).

### 2.3 A mikroszerkezet kiértékelésének menete

A mikroszerkezeti kiértékelés hagyományos metallográfiai csiszolatokkal történt. A próbatesteket a varrat keresztmetszetből munkáltuk ki, majd gyantába ágyasztuk. A beágyazott mintákat P4000 szemcsefinomságú SiC papírig csiszoltuk, majd 3 µm-es gyémánt szuszpenzióval políroztuk. A vegyes mikroszerkezetet két különböző marószert használatával tettük láthatóvá. A sovány duplex acél maratásához Beraha II-típusú marószert [18]: 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>, 5 másodperces maratási ideig, az auszteni rozsdamentes acélhoz Kalling-típusú marószert [19]: 20 ml

$C_2H_5OH + 40 \text{ ml HCl} + 2 \text{ g CuCl}_2$ , 25 másodperces maratási ideig használtunk. A maratást minden kötés esetén először a Kalling marószerezrel kezdtük. A varratfém ferrittartalmát egy Fischer FMP30 típusú ferritszkóppal mértük. A varrat kémiai összetételét Zeiss EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkóphoz kapcsolt (SEM) energiadiszperzív spektroszkópiával (EDS) vizsgáltuk. A hígulási arányt a metallográfiai próbatesteken, Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal mértük. A metallográfiai felvételeket Olympus PMG3 optikai mikroszkóppal készítettük.

## 2.4. A varratfém összetételének meghatározása egyezményes diagramokkal

A varratfémek kémiai összetételének és ferrittartalmának becslésére két különböző egyezményes diagramot használtunk. A Schaeffler-diagram (S) [15] a rozsdamentes acél varratfémek mikroszerkezetének becslésére használt hagyományos szerkezeti diagram, amelyet az Outokumpu (O) rozsdamentes acélgyártó kissé módosított [20]. A diagramok (S és O) szerinti  $CrE$  és  $NiE$  értékeket az (1-4) egyenletek mutatják:

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

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

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

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

A varratfém kémiai összetételét ( $X_{WM}$ ) a következő egyenlet (5) alapján határoztuk meg:

$$X_{WM} = D_{2101} \times X_{2101} + D_{304} \times X_{304} + D_{heg} \times X_{heg} \quad (5)$$

ahol  $D$  a két alapanyag és a hozaganyag hígulási aránya,  $X$  pedig az adott ötvözőelem mennyisége az alapanyagban és a hozaganyagban.

## 2.5 A korróziós vizsgálatok körülményei

A hegesztett lemezeket először  $25 \times 50$  mm-es próbatestekre vágtuk, amelyeket a korróziós vizsgálat előtt megtisztítottunk, pácoltunk és passzívtunk Polinox P Rapid pácolópasztával, 15 percig. A minták tömegét a vizsgálat előtt és 24 órával azt követően (ISO 17781 szerint) Denver Instrument APX-200 típusú precíziós mérlegen mértük, 0,1 mg pontossággal. A korróziós közeg 6%-os  $FeCl_3$  oldat volt az ASTM G48 szabvány szerint. A korróziós folyamat típusát sztereomikroszkópos technikával értékeltük.

## 3. Eredmények és értékelésük

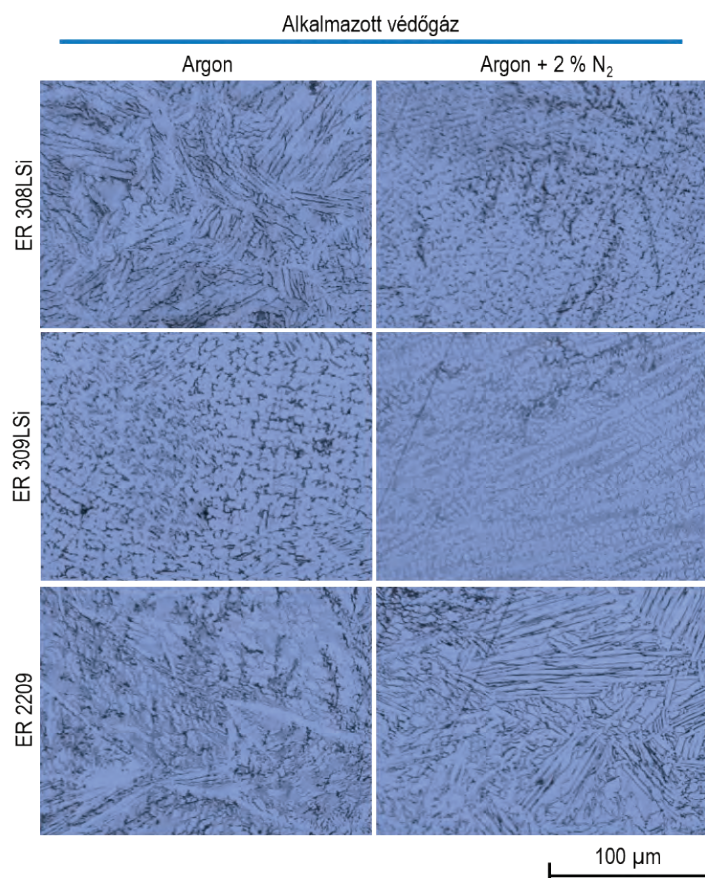
### 3.1 A varratfémek mikroszerkezetének értékelése

Az egyes varratfémek mikroszerkezetei az 1. ábrán láthatók maratott metallográfiai felvételeken. Az ER 2209 DSS hegesztőpálca hasz-

nálata nagyobb ferrittartalmú szövetszerkezetet (sötétebb területek) eredményezett mindkét védőgázzal. Az ER 308LSi ausztenites rozsdamentes acél hegesztőpálca és a főleg vegyes kötésekhez ajánlott, nagyobb Cr- és Ni-tartalmú 309LSi hegesztőpálca használata nagyobb ausztenittartalmú szövetszerkezetet eredményezett. A mikroszerkezeti képeken is látható, hogy a védőgázhoz adott nitrogén minden esetben nagymértékben elősegítette az ausztenitképződést a varratfémekben, de legjelentősebben az ER 308LSi hegesztőpálca esetében. A hőhatásövezet többnyire ferrites szövetszerkezetet mutatott, ami egyezik Pandey és munkatársai [21] eredményeivel.

### 3.2 A varratfém összetételének becslése az egyezményes diagramok szerint

A hígulási arányokat a hegesztett kötések keresztmetszete alapján számítottuk ki. A számítás eredmé-



1. ábra A varratfém mikroszerkezete különböző védőgázok és hozaganyagok felhasználásával



nyére egy példa a 2. ábrán látható, ami az ER 308LSi hegesztőpálcával készített vegyes kötést mutatja, Ar + 2% N<sub>2</sub> védőgázzal.

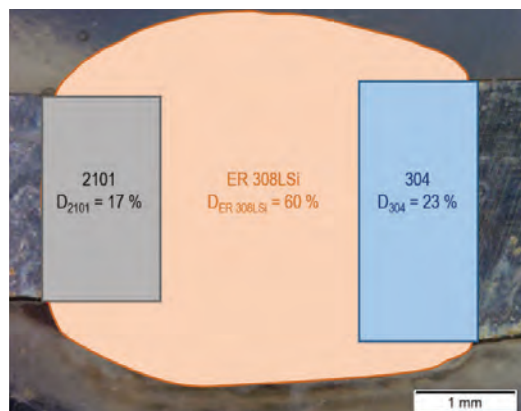
A hígulási arány eredményei a 4. táblázatban láthatók.

A varratok között néhány százalékos eltérés megfigyelhető volt, ami a kézi hegesztés jellegéből adódik. Az eredményekből az is látható, hogy a védőgáz összetétele is befolyásolja a hígulási arányt, mivel az ívplazma tulajdonságai és a termikus hatások is eltérő. A kémiai összetétel számításához az (5) egyenletet használtuk. A ferrittartalom becsléséhez a számított varratfém összetétel alapján a Schaeffler- és Outokumpu-diagramokat használtuk. A varratfém mért és becsült ferrittartalmának összehasonlítása az 5. táblázatban látható.

Az 5. táblázatból látható, hogy a védőgázhoz hozzáadott nitrogén ausztenitképző hatású. A nitrogén legjelentősebb hatását az ER 308LSi hegesztőpálcával készített varratban mértük, ahogyan az az 1. ábrán is látható. Az ER 2209 hegesztőpálca duplex varratfém eredményezett, mivel a mért ferrittartalom ~ 30%. A szerkezeti diagramokat összehasonlítva az Outokumpu-diagram jóval közelebbi becslést ad a mért ferrittartalomhoz, mivel a NiE (O) ((4) egyenlet) számításában a nitrogén is erős ausztenitképzőként jelenik meg. Erre azért volt szükség, hogy az 1949-es Schaeffler-diagram módosításával az Outokumpu-diagram alkalmazható legyen N-ötvözésű sovány duplex acélok varratfémének becslésére is.

A varratfém mért és becsült kémiai összetételének összehasonlítása a 6. táblázatban látható. A Cr, Ni, Mn és Mo ötvözőtartalmat SEM EDS-sel mértük, és a mért értéket a Schaeffler-diagram által adott becsléssel hasonlítottuk össze.

A 6. táblázatból látható, hogy a Schaeffler-diagram mindig alulbecsülte a Cr-tartalmat, és mindig túlbecsülte a Mn-tartalmat. A legjobb



2. ábra A hígulási arány számításának eredménye az ER 308LSi, Ar + 2% N<sub>2</sub> hegesztett kötés esetén

4. táblázat A hegesztett kötések keresztmetszetein mért különböző hígulási arány

Védőgáz	Hígulási arány (%)		
	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

5. táblázat A hegesztési varratfém mért és becsült ferrittartalmának összehasonlítása

TIG-pálca	Védőgáz	Ferrittartalom (%)		
		Mért	Becsült (S*)	Becsült (O**)
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

\*(S) – Schaeffler-diagram,

\*\*\*(O) – Outokumpu-diagram.

becslés az ER 2209 hegesztőpálca esetében volt. A védőgáz befolyásolja az ív tulajdonságait, a termikus hatásfokot és ezáltal a hígulási arányt. A különbségek mérhetők a varratfém kémiai összetételében a védőgáz függvényében. A legnagyobb eltérés a Mo- és Mn-tartalomban figyelhető meg, de a Cr- és Ni-tartalom jó korrelációt mutat (a legnagyobb hiba az Ar + 2% N<sub>2</sub> védőgáz és ER 309 LSi hegesztőpálca esetén 35,6%). Ez az eltérés jónak tekinthető, ha figyelembe vesszük, hogy a Schaeffler-diagram nem számol a hegesztési változókkal.

### 3.3 A korrózióállóság értékelése

Az argon védőgázzal hegesztett minták korona oldalának felülete a 24 órás korróziós vizsgálat után a 3. ábrán látható, ahol a varrat bal oldala mindig az LDX 2101 alapanyag, a jobb oldal pedig az AISI 304 alapanyag.

A 3. ábrán az ausztenites acél oldalon 24 óra elteltével minden esetben lyukkorrózió látható. Ennek oka az ausztenites anyag kisebb króm-tartalma a 2101 sovány duplex acélhoz, és a vizsgált három hozaganyaghoz képest. Ez a típusú

6. táblázat

A varratfémek mért (EDS) és becsült (S – Schaeffler) kémiai összetételének összehasonlítása

Elemek (tömeg%)	ER 308LSi		ER 309LSi		ER 2209	
	Ar	Ar+2% N <sub>2</sub>	Ar	Ar+2% N <sub>2</sub>	Ar	Ar+2% N <sub>2</sub>
Cr (EDS)	22,7	29,2	24,7	21,8	24,1	21,9
Cr (S)	19,4	19,2	22,1	21,5	24,0	21,5
Különbség (%)	-14,5	-34,2	-10,5	-1,4	-0,4	-1,8
Ni (EDS)	6,7	9,4	8,9	7,3	7,1	7,8
Ni (S)	7,7	7,9	9,7	9,9	7,1	6,9
Különbség (%)	14,9	-16,0	9,0	35,6	0,0	-11,5
Mn(EDS)	1,5	1,6	1,3	1,1	0,7	1,1
Mn (S)	2,4	2,3	2,7	2,5	2,1	2,3
Különbség (%)	60,0	43,8	107,7	127,3	200,0	109,1
Mo(EDS)	0,7	0,3	0,6	0,5	2	1,6
Mo (S)	0,1	0,1	0,2	0,2	2,2	1,9
Különbség (%)	-85,7	-66,7	-66,7	-60,0	10,0	18,8

korróziós mechanizmus jellemző az argon + 2% nitrogén védőgázzal hegesztett mintákra is.

A próbatetek tömegvesztesége százalékban a 24 órás korróziós teszt után a 4. ábrán látható. A minták tömegvesztesége nagyjából azonos volt. Ennek az az oka, hogy a lyukkorrózió az ausztenites oldalon, az AISI 304 alapanyagban indult meg. Így a hozaganyag és a felhasznált védőgáz ebben az esetben csekély mértékben befolyásolja a korrózióál-

lóságot. A kötések azonos ívenergiával lettek hegesztve, így a hőciklus hatása a hőhatásövezetre is azonos. Ennek ellenére a legkisebb korróziós arányt, 1,6%-os tömegveszteséget, az ER 308LSi (Ar védőgáz) és ER 309LSi (Ar + 2% N<sub>2</sub> védőgáz) hegesztőpálcák és védőgázok esetében mértük. Ez megegyezik Maurya és munkatársai eredményeivel, akik azt is megállapították, hogy az ER 309LMO pálcá adta a legjobb korrózióállóságot a különböző típusú hozaganyagok közül,

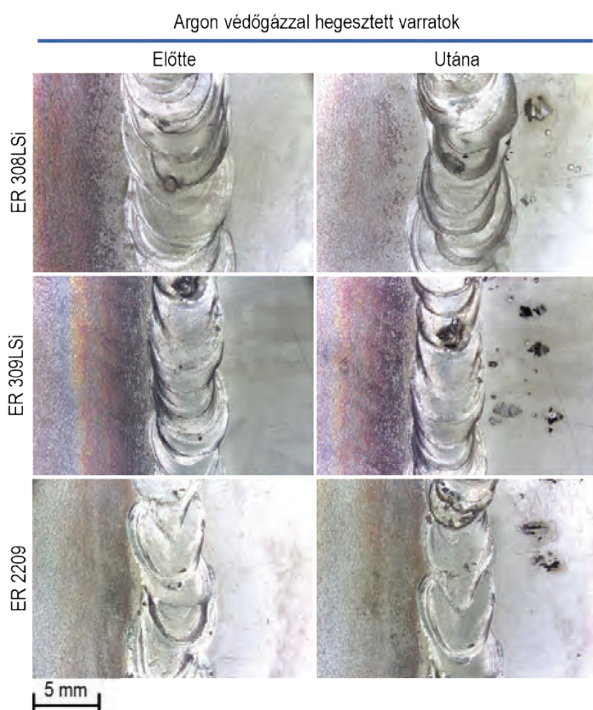
szuperausztenites és szuperduplex minőségek vegyes kötésére [22].

## 4. Összefoglalás

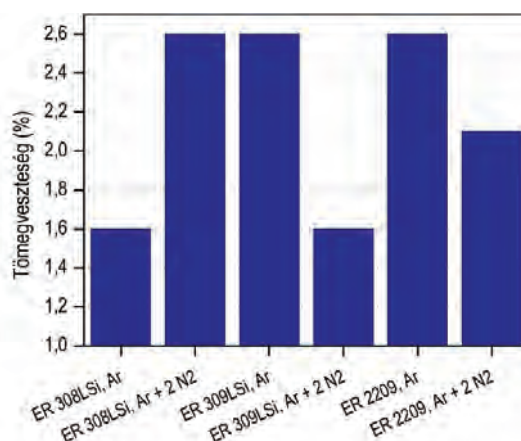
Kutatásunkban 2101 sovány duplex (X2CrMnNiN21-5-1) és AISI 304 (X5CrNi18-10) ausztenites rozsdamentes acél vegyes kötésait vizsgáltuk. A hegesztéseket volfrámelektrodás, védőgázos ívhegesztéssel készítettük, három különböző hegesztőpálcával: W 19 9 L Si (ER 308LSi), W 23 12 L Si (ER 309LSi) és W 22 9 3N L (ER 2209), valamint két különböző védőgázzal: argon és argon + 2% nitrogén. A kutatómunka célja a vegyes kötések összetételének becslése alkalmas egyezményes diagramok (Schaeffler- és Outokumpu-diagramok) használhatóságának vizsgálata, és a kötések korrózióállóságának elemzése volt.

Megállapítottuk, hogy a Schaeffler és az Outokumpu által kidolgozott egyezményes diagram is jól használható a varratfém ferrittartalmának és kémiai összetételének becslésére. A ferrittartalom maximum 30%-os hibával, a varratfém Cr- és Ni-tartalma pedig maximum 36%-os hibával becsülhető.

A 24 órás, 6%-os FeCl<sub>3</sub>-ban történő korróziós vizsgálat során minden esetben megindult lyukkorrózió, így a hozaganyag és a védőgáz nem befolyásolta a hegesztett kötések korrózióállóságát. Ennek ellenére a legkisebb tömegveszteséget az ER 308LSi és ER 309LSi hozaganyagok esetében mértük, ami 1,6% volt.



3. ábra A koronaoldal felülete az argon védőgázzal hegesztett minták 24 órás korróziós vizsgálata előtt és után (a varrat bal oldala: LDX 2101 alapanyag, a jobb oldal: AISI 304 alapanyag)



4. ábra A különböző paraméterekkel hegesztett próbatetek tömegvesztesége a 24 órás korróziós teszt után

## Köszönetnyilvánítás

A projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával – NKFIH, valósult meg (OTKA PD 138729).

A jelen cikk a szerzők XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencián tartott előadásának írásos kivonata.

## Irodalomjegyzék

- [1] Azevedo, C. R. F., Pereira, H. B., Wolyneec, S., Padilha A. F., "An overview of the recurrent failures of duplex stainless steels," *Engineering Failure Analysis*, vol. 97, no., pp. 161–188, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.12.009>
- [2] Świerczyńska A., Fydrych D., Landowski M., Rogalski G., Łabanowski J., "Hydrogen embrittlement of X2CrNiMoCuN25-6-3 super duplex stainless steel welded joints under cathodic protection," *Construction and Building Materials*, vol. 238, p. 117697, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117697>
- [3] Berecz T., Fazakas É., Fábíán E. R., Jenei P., Maróti J. E., "Investigation of Thermally Induced Deterioration Processes in Cold Worked SAF 2507 Type Duplex Stainless Steel by DTA," *Crystals*, vol. 10, no. 10, p. 937, 2020. <http://doi.org/10.3390/cryst10100937>
- [4] Mészáros I., Bögre B., Szabó P. J., "Magnetic and Thermoelectric Detection of Sigma Phase in 2507 Duplex Stainless Steel," *Crystals*, vol. 12, no. 4, p. 527, 2022. <https://doi.org/10.3390/cryst12040527>
- [5] Mohan D. G., Tomków J., Karganroudi S. S., "Laser Welding of UNS S33207 Hyper-Duplex Stainless Steel to 6061 Aluminum Alloy Using High Entropy Alloy as a Filler Material", *Applied Sciences*, vol. 12, no. 6, pp. 2849, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12062849>
- [6] Nagy A. I., Fábíán E. R., Horváth R., Terek P., "Difficulties in the Machining Super Duplex Stainless Steels," *Műszaki Tudományos Közlemények*, vol. 11, no. 1, pp. 141–144, 2019. <https://doi.org/10.33894/mtk-2019.11.31>
- [7] Olsson J. Snis M., "Duplex - A new generation of stainless steels for desalination plants," *Desalination*, vol. 205, no. 1–3, pp. 104–113, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.051>
- [8] Boillot P. Peultier J., "Use of stainless steels in the industry: recent and future developments," *Procedia Engineering*, vol. 83, pp. 309–321, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.015>
- [9] Payares-Asprino Carolina, "Prediction of Mechanical Properties as a Function of Welding Variables in Robotic Gas Metal Arc Welding of Duplex Stainless Steels SAF 2205 Welds Through Artificial Neural Networks", *Advances in Materials Science*, vol. 21, no. 3, pp. 75–90, 2021. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0019>
- [10] Rogalski G., Świerczyńska A., Fydrych D., Landowski M., "The influence of solution annealing temperature on the properties of Lean Duplex 2101 welded joints in tubes," *Welding Technology Review*, vol. 91, no. 4, pp. 49–59, 2019. <https://doi.org/10.26628/wtr.v91i4.1017>
- [11] Landowski M., Świerczyńska A., Rogalski G., Fydrych D., "Autogenous Fiber Laser Welding of 316L Austenitic and 2304 Lean Duplex Stainless Steels," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 13, p. 2930, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13132930>
- [12] Dobránszky J., Lőrinc Z., Gyimesi F., Szigethy A., Bitay E., "Laser welding of lean duplex stainless steels and their dissimilar joints," In: 8th European Stainless Steel and Duplex Stainless Steel Conference, 2015.
- [13] Kemény D. M., Kovács D., "The Effect of Welding Parameters on the Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steel," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 66, no. 2, pp. 151–157, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3311/PPme.19568>
- [14] Kovács D. Dobránszky J., "Effects of Thermochemical Surface Treatments on the Industrially Important Properties of X2CrNiMo 17-12-2 Austenitic Stainless Steel," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 63, no. 3, pp. 214–219, 2019. <https://doi.org/10.3311/PPme.13921>
- [15] Schaeffler A. L., "Constitutional Diagram for Stainless Steel Weld Metal," *Metal Progress*, vol. 56, pp. 680–680B, 1949.
- [16] Hertzman S., "The influence of nitrogen on microstructure and properties of highly alloyed stainless steel welds," *ISIJ International*, vol. 41, no. 6, pp. 580–589, 2001. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.580>
- [17] Varbai B, Adonyi U. Y., Baumer R., Pickle T., Dobránszky J., Majlinger K., "Weldability of Duplex Stainless Steels-Thermal Cycle and Nitrogen Effects," *Welding Journal*, vol. 98, no. 3, pp. 78-S-87-S, 2019. <https://doi.org/10.29391/2019.98.006>
- [18] Varbai B, Májlinger K., "Optimal etching sequence for austenite to ferrite ratio evaluation of two lean duplex stainless steel weldments," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.060>
- [19] Ozlati A, Movahedi M., "Effect of welding heat-input on tensile strength and fracture location in upset resistance weld of martensitic stainless steel to duplex stainless steel rods," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 517–525, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.039>
- [20] Outokumpu, *Handbook of Stainless Steel*. Avesta: Outokumpu Oyj, 2013
- [21] Pandey C., Thakare J. G., Taraphdar P. K., Kumar P., Gupta A., Sirohi S., "Characterization of the soft zone in dissimilar welds joint of 2.25Cr-1Mo and lean duplex LDX2101 steel", *Fusion Engineering and Design*, vol. 163, pp. 112147, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112147>
- [22] Maurya A. K., Pandey C., Chhibber R., "Dissimilar welding of duplex stainless steel with Ni alloys: A review", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 192, pp. 104439, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104439>