

VARBAI BALÁZS – GÁL ISTVÁN – FÁBIÁN ENIKŐ RÉKA – FAZAKAS ÉVA – MÁJLINGER KORNÉL

Auszténites és duplex korrózióálló acélok vegyes kötéseinek korróziós tulajdonságai

Kísérleteink során 1.4404 típusú auszténites és 1.4462 típusú duplex korrózióálló acélok vegyes kötéseit készítettük el huzalelektrodás védőgázos hegesztési eljárással, ISO 14343-B – SS316LSi auszténites és ISO 14343-B – SS2209 duplex hozaganyagokkal. A két eltérő szövetszerkezetű korrózióálló acél kötésének igénye nagynyomású olajfúró csövek hegesztésekor merült fel. A hegesztett kötések elkészítettük gyökoldali gázvédelem nélkül, majd argon és nitrogén gyökoldali védelem mellett.

Az elvégzett korróziós vizsgálatok alapján a duplex hozaganyaggal hegesztett minta jobb korrózióállóságot mutatott, mint az auszténites huzallal készült. Az argon vagy nitrogén gyökoldali gázvédelem mellett hegesztett minták mindkét hozaganyag esetén jobb korrózióállóságot mutattak, mint a gyökoldali gázvédelem nélkül hegesztettek.

Bevezetés

A duplex korrózióálló acélok egyre nagyobb szerepet kapnak a korrózióálló acélok családján belül [1], és ezzel arányosan egyre több esetben merül fel az a feladat, hogy duplex acélt attól eltérő szövetszerkezetű, legtöbbször auszténites, korrózióálló acéllal [2–5], vagy két eltérő anyagminőségű duplex acélt kell összehegesztetni [6, 7]. Két eltérő szövetszerkezetű korrózióálló acél összehegesztésekor kiemelten fontos a kialakult varrat korrózióállósága, és ezzel szoros összefüggésben a varrat fázisainak aránya. A jelen kutatásban is felhasznált 1.4404 auszténites és 1.4462 duplex korrózióálló alapanya-

gok kézi ívhegesztéssel kialakított vegyes kötése során kutatók azt találták [8, 9], hogy a szemcsehatármenti korrózióval szembeni ellenállás javul nagy ($0,6-0,7 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$) hőbevitel mellett, az ISO 3581-B– ES2209 duplex elektróda használatkor. Ugyancsak kézi ívhegesztés esetén az ES2209 elektródával készült varrat jobb korrózióállóságot mutatott, mint az ES309L auszténites varrat [10]. Volfrámelektrodás védőgázos ívhegesztés (TIG-hegesztés) alkalmazásakor különböző típusú (ISO 14343-B – SS347 és SS309LMO) auszténites hozaganyag alkalmazása során a legjobb korrózióállóságot az SS309LMO hozaganyaggal hegesztett minta mutatta [11]. Szintén TIG-hegesztéssel kialakított

szuperduplex és szuperauszténites alapanyagok vegyes kötések [12] az Ar + 2% N₂ védőgáz a lyukkorrózióval szemben jobb ellenállást mutatott, mint a tiszta argonnal hegesztett minta. Jelen kutatómunkánk témája egy ipari alkalmazásból indult. A nagynyomású olajipari tömlők kialakítása során az olcsóbb, de kisebb korrózióállóságú 1.4404 auszténites alapanyagú alkatrészt, a korróziós közegnek kitett, jobb korrózióállóságú 1.4462 duplex alapanyagú alkatrészhez hegesztik. Az elvégzett kísérleteink alapján, a korábbi kutatásoknak megfelelően, a duplex hozaganyaggal hegesztett minták jobb korrózióállóságot mutattak az 1.4404 és az 1.4462 alapanyagok vegyes kötések, mint az auszténites hozaganyaggal hegesztettek. Kimutattuk a külön gyökoldali védőgáz (argon vagy nitrogén) alkalmazásának korrózióállóságot javító hatását is a gyökoldali gázvédelem nélkül hegesztett mintákkal szemben.

Felhasznált anyagok és berendezések

A hegesztett kötést tömör huzalelektrodás, aktív védőgázos ívhegesztési eljárással (MAG-hegesztés), impulzusos (Rehm Mega Puls 300) anyagát-

Varbai Balázs okleveles gépészmérnök 2015 óta a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékén tanársegéd és PhD-hallgató. Kutatási területe a duplex korrózióálló acélok hegeszhetősége.

Gál István anyagmérnök, hegesztőtechnológus-szakmérnök (EWE/IWE, 2017, BME). 2010 óta a ContiTech Rubber Industrial Kft.-nél tölt be gyártástámogató mérnöki pozíciót.

Fábián Enikő Réka okleveles kohómérnök (1993), hegesztőtechnológus-szakmérnök (2015), PhD (2012). 2010 és 2017 között a BME Gépészmérnöki Kar Anyagtudomány és Technológia Tanszéken tanársegéd, majd adjunktus, a metallográfiai laboratórium vezetője. 2018-tól az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karának Anyag- és Gyártástudományi Intézetében egyetemi docens.

Fazakas Éva PhD szakmai életrajzát a BKL Kohászat 2016/5-6. számának 48. oldalán közzétették.

Májlinger Kornél PhD, okleveles gépészmérnök nemzetközi hegesztőmérnök (IWE), a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének adjunktusa. 2013-tól a hegesztő technológus szakirányú továbbképzés felelőse a BME-n, fő kutatási területe a nagyszilárdságú acélok hegesztése.

1. táblázat. A kísérletek során alkalmazott hegesztési paraméterek

Áramerősség (A)	Feszültség (V)	Huzalelőtolási sebesség (m·min ⁻¹)	Hegesztési sebesség (mm·s ⁻¹)	Védőgáz-áram (l·min ⁻¹)	Gyökvédőgáz-áram (l·min ⁻¹)	Elméleti hőbevitel (kJ·mm ⁻¹)
107	18,2	3,6	10	14	7	0,155

vitellel végeztük, 2,5 mm vastag 1.4404 ausztenites és 1.4462 duplex alapanyagokon. Hozaganyagként 1,2 mm átmérőjű, ISO 14343-B –SS2209 duplex és SS316LSi ausztenites huzalt használtunk. A védőgáz minden esetben 98% Ar + 2% O₂ gázkeverék volt. A hegesztést elvégeztük gyökoldali gázvédelem nélkül (vagyis szabad levegőn) és Ar, valamint N₂ gyökoldali gázvédelemmel. A tompakötést 1 mm-es gyökhézaggal illesztettük. Az alkalmazott hegesztési paramétereket az 1. táblázat, a felhasznált anyagok kémiai összetételét a 2. táblázat tartalmazza. A varratfém összetételének előzetes becslésekor feltételeztük, hogy az alapanyagok 15%-os, a hozaganyag 70%-os mértékkel vesznek részt a varratfém kialakításában.

Az alapanyagok (mért) és a hozaganyagok (adatlapról kivett) összetételét tartalmazza a 2. táblázat. A táblázatban szereplő PRE lyukkorróziós ellenállási tényezőt az EN 10088-1:2014-es szabvány D melléklete szerint duplex acélra az (1) egyenlet, ausztenites acélra a (2) egyenlet szerint számoltuk.

$$PRE (duplex) = Cr + 3,3Mo + 16N \quad (1)$$

$$PRE (ausztenites) = Cr + 3,3Mo + 30N \quad (2)$$

A táblázatban szereplő ausztenit/ferrit arányt (A/F) a Schaeffler–De Long-diagram (1. ábra) alapján határoztuk meg, ahol az ausztenit-(NiE) és ferritképzők (CrE) a (3) és (4) egyenlet szerinti képlettel számolhatók:

$$NiE = Ni + 30(C + N) + 0,5Mn \quad (3)$$

$$CrE = Cr + Mo + 1,5Si \quad (4)$$

A hegesztett varratok értékelését szemrevételezéssel, valamint mechanikai, metallográfiai és korróziós vizsgálatok segítségével végeztük. A metallográfiai minták előkészítését beágyazás után hagyományos mó-

2. táblázat. Az alkalmazott alapanyagok, hozaganyagok és a kialakuló varratfém (VF) kémiai összetétele, PRE-száma és számított ausztenit/ferrit fázisaránya

Anyag(rész)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	PRE	A/F
	tömeg%								%
1.4404 (lemez)	0,020	0,31	0,79	16,2	10,2	1,8	-	22	96/4
1.4462 (lemez)	0,015	0,38	1,23	22,6	5,5	3,2	0,17	36	68/32
SS316LSi (huzal)	0,020	0,80	1,70	18,8	12,5	2,8	-	28	92/8
SS2209 (huzal)	0,015	0,40	1,70	22,5	8,8	3,2	0,15	35	84/16
Ausztenites VF	0,019	0,66	1,49	18,9	11,1	2,7	0,03	29	90/10
Duplex VF	0,016	0,38	1,49	21,6	8,5	2,9	0,13	33	84/16

don hajtottuk végre. A csiszolatok előkészítésénél először Kalling-marószert (100 ml etilalkohol, 100 ml sósav, 5 g réz-klorid), majd Beraha-reagenst (85 ml desztillált víz, 15 ml sósav, 1 g kálium-metabiszulfít) használtunk. A szövetszerkezeti felvételeken világos területként jelennek meg az ausztenites és sötét területként a ferrites fázisok (például 3. ábra). A szövetszerkezet vizsgálatát Olympus SZX16 és Olympus PMG-3 mikroszkóppal, az összetétel vizsgálatát Inspect S50 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük. A szövetelemek arányát Fischer FMP30 ferritszkóppal mértük. A keménységeloszlást KB Prüftechnik típusú Vickers-keménységmérővel mértük, 98 N ter-

helés mellett. A korróziós vizsgálatokhoz a mintákat az ASTM G 48-as szabvány előírásainak megfelelően előkészítettük, és 72 órára 22 °C-on és 50 °C-on, 6 tömeg%-os vas(III)-klorid oldatba helyeztük. A kiértékelés során mértük a minták vizsgálat előtti és utáni tömegét. A polarizációs görbék felvétele Zahner IM6e potenciostáttal történt, hagyományos, három-elektrodos cellában. Referenciaelektrodként kalomelektrodot Hg₂Cl₂/KCl_{tel.}, segédelektrodként Pt-huzalt és munkaelektrodként a mintadarabot alkalmaztuk. A mérések során a potenciált másodpercenként 10 mV értékkel léptettük, és mértük az áramválaszt. A méréseket 3,5% NaCl-oldatban végeztük, szobahőmérsékleten.

A korrózió sebességének kiszámításához az (5) szerinti képletet alkalmaztuk:

$$v_{korr} \left(\frac{mm}{év} \right) = \frac{K \cdot j_{korr} \cdot E_W}{D} \quad (5)$$

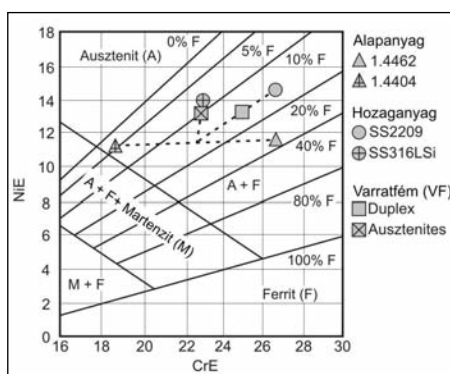
ahol:

$$K = 3,27 \cdot 10^{-3} \left(\frac{mm \cdot g}{\mu A \cdot cm \cdot év} \right) \text{ korróziós együttható,}$$

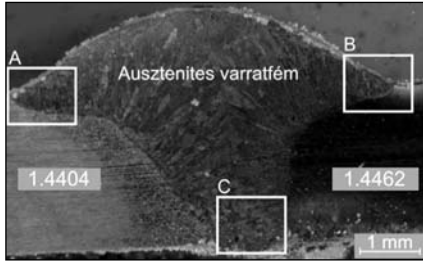
$$j_{korr} \left(\frac{\mu A}{cm^2} \right) \text{ korróziós áramsűrűség,}$$

$$E_W \left(\frac{g}{mol} \right) \text{ egyensúlyi tömeg,}$$

$$D \left(\frac{g}{m^3} \right) \text{ sűrűség.}$$



1. ábra. A felhasznált alapanyagok, hozaganyagok és a kialakuló varratok szövetszerkezetének ábrázolása a Schaeffler–DeLong-diagramban



■ **2. ábra.** Ausztenites huzallal készült vegyes kötés sztereomikroszkópos képe. Az A-, B-, C-vel jelölt területek a metallográfiai felvételek helyeit mutatják (3. ábra)

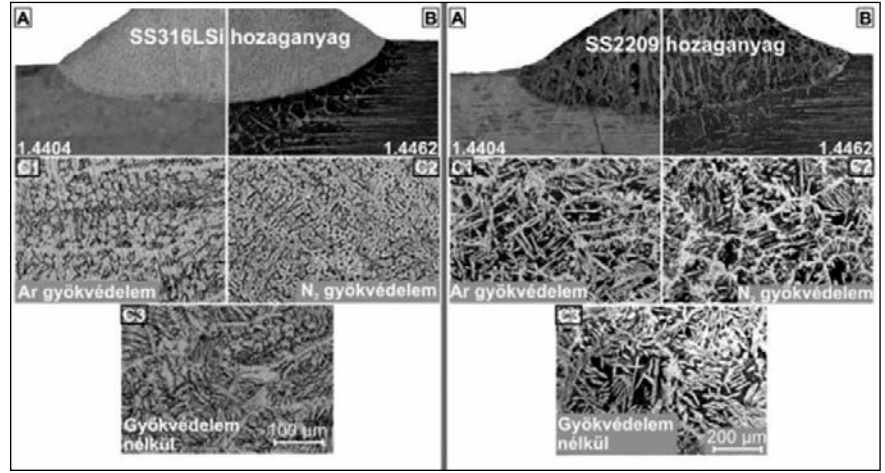
Eredmények és értékelésük

A különböző paraméterekkel hegesztett varratok szemrevételezéses kiértékelése során a legszembeütőbb a gyökoldali gázvédelem hatása volt. Mindkét hozaganyag esetén a gyökoldali gázvédelem nélkül hegesztett varratok gyökoldala porózus, oxidréteggel takart. Ezzel szemben mind az argon, mind a nitrogén gyökoldali védelem alkalmazása esetén fémtiszta felületet kaptunk. A varratkeresztmetszet sztereomikroszkópos értékelésekor feltűnő volt, hogy az ausztenites huzallal hegesztett varratok minden esetben aszimmetrikusak (a duplex alapanyag felé tolódott, 2. ábra), duplex huzal esetén viszont szimmetrikusak.

A kis hőbevitel miatt az ausztenites oldalon a hőhatásövezet jellemző szélessége ~ 0,5 mm, a duplex oldalon ~ 0,15 mm. A metallográfiai képek alapján (3. ábra) szemrevételezéssel is megállapítható, hogy a varrat ferrittartalma a duplex huzal esetén lesz nagyobb.

A varratban ferritszakkóppal mért fázisarányt tartalmazza a 3. táblázat. A mérésből látszik, hogy a duplex hozaganyag esetén nagyobb ferrittartalmat mértünk, mint az előzetesen becsült 16% (2. táblázat). Ausztenites huzal használatakor a mért ferrittartalom jobban közelít az becsült 10%-hoz.

Az argon gyökvédelem mellett hegesztett két mintán energiadiszipatív röntgenspektroszkópos méréssel mértük a kialakult varratok kémiai összetételét (4. táblázat). A mérés a kis rendszámú elemek (C, N)



■ **3. ábra.** A két különböző hozaganyaggal és három különböző gyökoldali védelemmel ellátott heterogén varratok szövetszerkezeti képei

3. táblázat. A varratban mért ferrittartalom az alkalmazott huzal és gyökoldali gázvédelem függvényében

Hozaganyag típus	Ausztenites			Duplex			
	Gyökvédelem	Nincs	Ar	N ₂	Nincs	Ar	N ₂
Ferrittartalom (%)		14,2±1	10,3±1	9,4±1	29,3±1	38,9±1	39,9±1

4. táblázat. A varratban mért és előzetesen becsült (2. táblázat) Cr- és Ni-tartalom

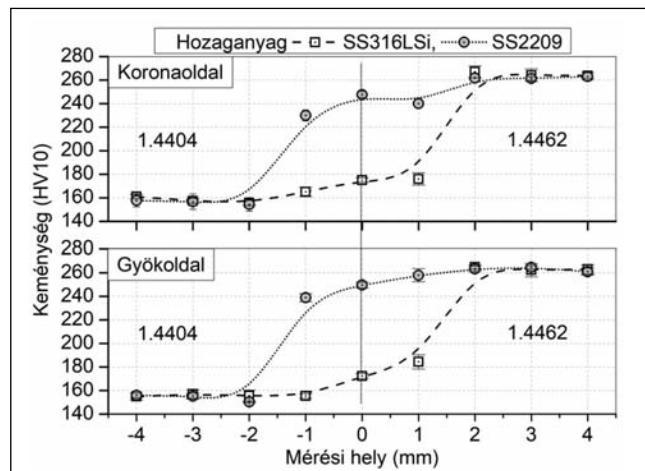
Cr- és Ni-tartalom (tömeg%)		Ausztenites	Duplex
Cr	Becsült	18,90	21,60
	Mért	20,35	21,69
Ni	Becsült	11,10	8,50
	Mért	9,37	8,06

mennyiségének meghatározására nem alkalmas, ezért a mért adatok alapján Cr- és Ni-egyenértéket nem számoltunk. A varratfémekben mért Cr- és Ni-ötözők mennyisége azonban jól közelít az előzetesen becsült értékekhez (1. 2. táblázat).

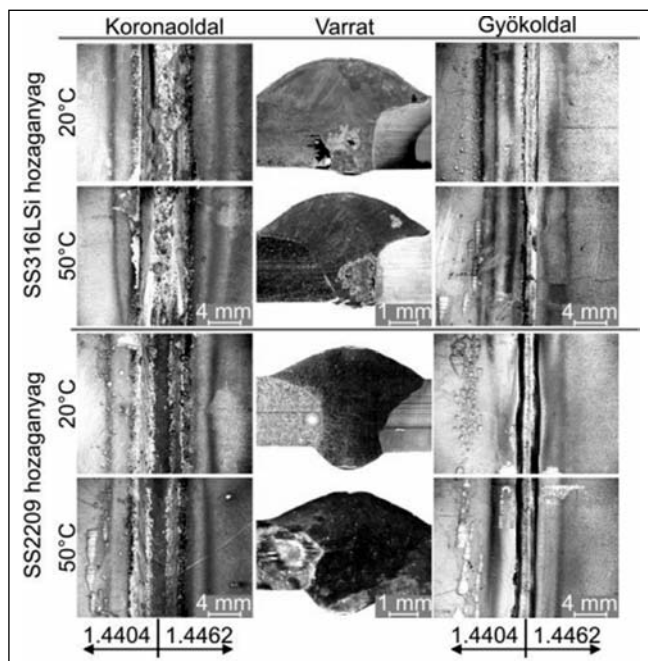
Az alkalmazott 1.4404 ausztenites

alapanyag mért HV10 keménységértéke 158±6, az 1.4462 duplex alapanyagé pedig 261±4 HV10. A keménységeloszlás mérését mind a korona-, mind a gyökoldalon a lemez síkjától 0,5 mm-re, keresztcsiszolaton végeztük el. A 4. ábrán az látszik, hogy a keménység az ausztenites oldal felől a duplex alapanyag felé monoton növekszik, ameddig el nem éri a duplex alapanyagét. A három különböző gyökoldali védelem esetén a mérhető keménységértékek között különbséget nem tapasztaltunk, azok a szóráson belül voltak.

Az ASTM G 48 korróziós kísérlet eredményeit az 5. táblázatban foglaltuk össze, ahol az értékek a 72 óra leteltével, mg·cm⁻²-ben kifejezett fogyások. A vizsgálat során a duplex hozaganyag és az ausztenites hozaganyag gyökvédelem



■ **4. ábra.** A két különböző huzallal hegesztett varrat keménységeloszlása a korona- és gyökoldalon



■ 5. ábra. Felületi és csiszolati sztereomikroszkópos felvételek a minták 72 órás, ASTM G 48 szerinti korróziós vizsgálata után

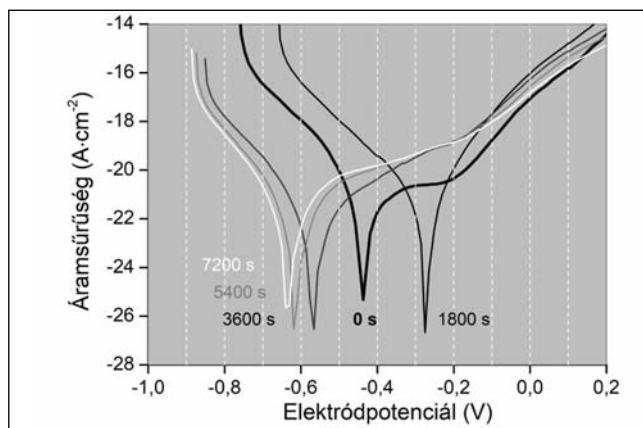
nélküli alkalmazása között sem 22 °C-on, sem 50 °C-on nem tapasztalható jelentős különbség, de a hőmérséklet emelése mindkét minta esetén jelentősen befolyásolta a mintákon mért korróziós fogyást. Mind az argon, mind a nitrogén gyökvédelemmel hegesztett minták eredményei jól mutatják a gyökvédelem kedvező hatását, 22 °C-on és 50 °C-on egyaránt. A két gyökvédelemként alkalmazott gáz hatása között nem állapítható meg egyértelmű különbség. Nagyobb hőmérsékleten a nitrogén gyökoldali gázvédelemmel hegesztett varrat mutatott jobb korrózióállóságot.

Az ASTM G 48 korróziós vizsgálat elvégzése után a csiszolatokról sztereomikroszkópos és szövetszer-

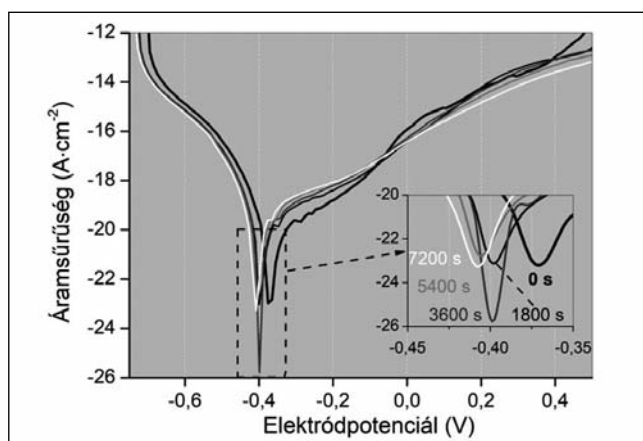
kezeti felvételeket készítettünk (5. ábra). A 22 °C-on végzett vizsgálatoknál nitrogén gyökvédelem mellett, az ausztenites huzallal hegesztett minták hőhatásövezetében nagyobb mértékű lyukkorrózió volt tapasztalható, mint a külön gyökvédelem nélküli hegesztett mintáknál. A gyökvédelem nélkül hegesztett mintákon a korrózió a gyökoldalra koncentrált. 50 °C-on az argon gyökvédelem használata mellett hegesztett minták is nagymértékű lyukkorróziót szenvedtek. Gyökvédelem alkalmazásakor a helyi kor-

5. táblázat. Az ASTM G 48 szerinti korróziós vizsgálat eredményei

Hozaganyag	Hőmérséklet (°C)	Gyökvédőgáz	Korróziós fogyás (mg·cm ⁻²)
SS316LSi	22	Nincs	23
		Ar	28
		N ₂	30
	50	Nincs	99
		Ar	44
SS2209	22	Nincs	19
		Ar	23
		N ₂	29
	50	Nincs	103
		Ar	47
		N ₂	45



■ 6. ábra. Az ausztenites huzallal hegesztett minta polarizációs görbéje



■ 7. ábra. A duplex huzallal hegesztett minta polarizációs görbéje

rózió az ausztenites alapanyag teljes felületére jellemző volt (5. ábra).

Az ASTM G 61 szabvány szerinti polarizációs görbék felvételekor a kapott korróziós áramsűrűség és elektrodpotenciál értékeket az ausztenites hozaganyaggal hegesztett minta esetén a 6. ábrán, a duplex hozaganyaggal hegesztett minta esetén a 7. ábrán foglaltuk össze. Az ausztenites hozaganyaggal hegesztett mintáknál az elektrodpotenciál-értékek enyhe növekedést mutatnak. A bemelegítési idő növelésével a korróziós áram is folyamatosan változott, melynek oka, hogy passzív réteg nem alakult ki a varrat felületén. A duplex hozaganyaggal hegesztett minta esetében az áramsűrűség és az elektrodpotenciál is alig változott. A vizsgálat kezdetekor számított korróziós sebesség 4,0 μm·év⁻¹, mely 2 óra vizsgálati idő után is csak 4,4 μm·év⁻¹ értékre növekedett (6. táblázat). Valószínűsíthető, hogy stabil oxidréteg alakult ki mindjárt a bemelegítés után, amely védte a varrat felületét a további korróziótól.

A számolt korróziósebességeket (lásd (4) egyenlet) tartalmazza a 6. táblázat.

Összefoglalás

Munkánk során 1.4404 ausztenites és 1.4462 duplex szövetszerkezetű korrózióálló acélok MAG-hegesztett vegyes kötéseit készítettük el két különböző (ISO 14343-B – SS316LSi ausztenites és ISO 14343-B – SS2209 duplex) huzal segítségével. A tompavarratokat gyökoldali védelem nélkül és argon, valamint nitrogén gázvédelem mellett is elkészítettük. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható:

- Az ausztenites huzal esetében a varratban kialakult ferrittartalom 9–14%, duplex huzal esetén 29–40%, mely jobban közelíti a duplex acélok-nál ideálisnak tekinthető 50-50% fázisarányt. A gyökoldali gázvédelem hatása a szövetelemek arányában nem látható.

- A varratfémekben mért Cr- és Ni-tartalom alapján a feltételezett keveredési arány helyes volt (alapanyagok 15%, hozaganyag 70%).

- Az 50 °C hőmérsékleten elvégzett ASTM G 48 korróziós vizsgálat során a mért korróziósebesség mind ausztenites, mind duplex hozaganyaggal hegesztett minta esetében argon vagy nitrogén gyökoldali védelem mellett 30 mg·cm⁻² és 50 mg·cm⁻² között volt. Gyökoldali védelem nélkül mindkét hozaganyag esetén romlik a korrózióállóság, a mért fogyás 100 mg·cm⁻² körüli.

- A polarizációs görbék felvételekor kapott eredmények alapján a duplex hozaganyaggal hegesztett varrat sokkal jobb korrózióállóságot mutat. A mért korróziósebesség 2 óra vizsgálati idő után 4,4 μm·év⁻¹, míg ausztenites hozaganyag esetén 8,0 μm·év⁻¹.

- A fentiek alapján korróziós hatásoknak fokozottan kitett duplex és ausztenites vegyes kötések esetén duplex hozaganyag használata ajánlott.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta (BO/00196/16/6). A projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs

6. táblázat. A polarizációs görbék áramsűrűség-adataiból számolt korróziósebességek

Kötéshez használt huzaltípus	Vizsgálat ideje (s)				
	0	1800	3600	5400	7200
	Korróziósebesség, v_{korr} (μm·év ⁻¹)				
SS316LSi	5,0	4,0	7,0	8,0	8,0
SS2209	4,0	4,2	5,0	4,6	4,4

Hivatal támogatásával – NKFIH, valósult meg (OTKA PD 120865).

Az elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatokban nyújtott segítségért köszönettel tartozunk a BME Elektronikai Technológia Tanszéken dolgozó kollégáinknak.

Irodalom

[1] Dobránszky J., Kovács D.: Szemlézés a rozsdamentes acélok gyártásának európai kutatásaiból, BKL Kohászat 149 (1) (2016) 6–10.

[2] Bhattacharya A., Kumar R.: Dissimilar Joining Between Austenitic and Duplex Stainless Steel in Double-Shielded GMAW: A Comparative Study, Materials Manufacturing Processes 31(3) (2016) 300–310.

[3] Alcantara A. S., Fábrián E. R., Furkó M., Fazakas É., Dobránszky J., Berecz T.: Corrosion resistance of TIG welded joints of stainless steels, Materials Science Forum 885 (2017) 190–195.

[4] Sándor T., Dobránszky J.: Microstructural properties of the heterogeneous welded joints of LDX2101 and AISI 304 stainless steels, 8th Duplex Stainless Steels Conference (2010)

[5] Harasztí F., Kovács T.: Plastic deformation effect of the corrosion resistance in case of austenitic stainless steel, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 175 (2017)

[6] Dobránszky J., Lőrinc Zs., Gyimesi F., Szigethy A., Bitay E.: Laser welding of lean duplex stainless steels and their dissimilar joints, 8th European Stainless Steel and Duplex Stainless Steel Conference (2015)

[7] Fábrián E. R., Dobránszky J., Csizmazia J., Ott R.: Effect of laser beam welding on the microstructure of duplex stainless steels, Materials Science Forum 885 (2017) 245–250.

[8] Verma J., Taiwade R. V.: Dissimilar welding behavior of 22% Cr series stainless steel with 316L and its corrosion resistance in modified aggressive environment, Journal of Manufacturing Processes 24 (2016) 1–10.

[9] Verma J., Taiwade R. V., Khartikar R. K., Sapate S. G., Gaikwad A. D.: Microstructure, Mechanical and Intergranular Corrosion Behavior of Dissimilar DSS 2205 and ASS 316L Shielded Metal Arc Welds, Transactions of the Indian Institute of Metals (2016) 1–13.

[10] Verma J., Taiwade R. V., Khartikar R. K., Kumar A.: A Comparative Study on the Effect of Electrode on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Welds of 2205 Austeno-Ferritic and 316L Austenitic Stainless Steel, Materials Transactions The Japan Institute of Metals and Materials 57(4) (2016) 494–500.

[11] Moteshakker A., Danaee I.: Microstructure and Corrosion Resistance of Dissimilar Weld-Joints between Duplex Stainless Steel 2205 and Austenitic Stainless Steel 316L, Journal of Materials Science & Technology 32(3) (2016) 282–290.

[12] Zhou Z., Löthman J.: Dissimilar welding of super-duplex and super-austenitic stainless steels, Welding in the World 61(1) (2017) 21–33.