

Tóth Tamás\*, Klaus Dilger

# Duplex acélok elektronsugaras hegesztése nikkelbázisú hegesztőhuzal alkalmazásával

## Electron beam welding of duplex stainless steels using nickel-based filler wire

Technische Universität Braunschweig, Institute of joining and welding

\* t.toth@tu-braunschweig.de

### Absztrakt

A nagy falvastagsággal rendelkező, duplex acélból készült alkatrészek (például hosszvarratos csövek) kötéstechológiájára az elektronsugaras hegesztés számos esetben megfontolandó lehetőséget kínál, köszönhetően az eljárás által biztosított műszaki és gazdaságossági előnyöknek. Erre az eljárásra azonban jellemző a gyors hűlés, mely a vákuum által okozott nitrogénvesztés mellett az ausztenitátalakulás elégtelen mivoltához vezet. Ennek kompenzálása érdekében a kutatás során 1.4462 jelű standard duplex acél hegesztésekor nikkelt adtunk a hegfűrdőbe huzal formájában. Köszönhetően a nikkel ausztenitképző hatásának, kiegyensúlyozott szövetszerkezet jött létre változatlan hűlési viszonyok mellett. A nikkelbázisú huzal és az alapanyag elkeveredését az elektronsugaros oszcillálásával segítettük elő, amely az ausztenit egy csupán minimális inhomogenitással rendelkező eloszlásához vezetett. Ez magával vonta a varrat jó szívósságát, kielégítve a különféle szabványok követelményeit.

**Kulcsszavak:** Duplex korrózióálló acélok, elektronsugaras hegesztés, ausztenit, ferrit, nikkel

### Abstract

For joining of thick walled components (e.g. longitudinally welded pipes) of duplex stainless steels components, the electron beam welding can be frequently taken into consideration due to technical and economical benefits. This process is characterized by a high cooling rate combined with a relatively great loss of nitrogen, resulting in insufficient austenite formation. To compensate this phenomenon, nickel addition, in wire form, was conducted in this study. This promoted the formation of austenite at the same cooling rate, so that approximately an equal amount of ferrite and austenite was achieved. Beam oscillation was applied to maintain good dilution even at large depth/width ratios. This resulted in a good weld dilution and consequently in an austenite distribution with a low inhomogeneity. This entailed high toughness of the weld metal, fulfilling the requirements of the common standards.

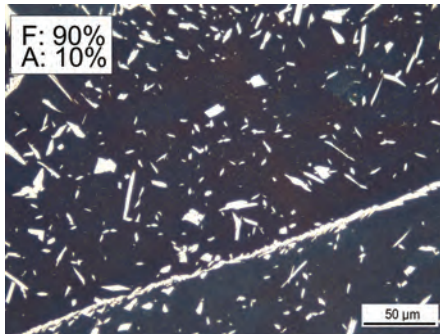
**Key words:** Duplex stainless steels, electron beam welding, austenite, ferrite, nickel

### 1. Bevezetés

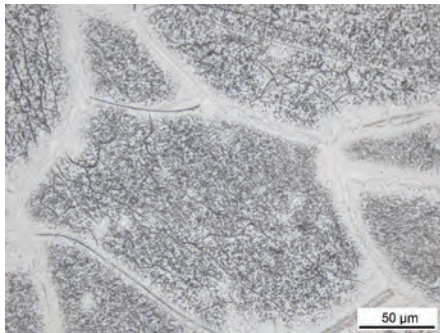
A duplex korrózióálló acélok olyan kettős szövetszerkezetű, a Fe-Cr-Ni-N rendszerbe besorolható ötvözetek, amelyekben mind a ferrites, mind pedig az ausztenites fázis legalább 30%-ban van jelen [1-2]. A kémiai összetételt illetően ezen anyagok jellemzően 19-30% krómot, 1-7% nikkelt, 0-5% molibdént és 0,1-0,35% nitrogént tartalmaznak. Ennek az összetételnek, illetve az ideális esetben kiegyensúlyozott kettős szövetszerkezetnek köszönhetően a duplex acélok nagyobb szakítószil-

árdságot, illetve jobb lyukkorrózióval és feszültségkorrózióval szembeni ellenállást tudhatnak magukénak a hagyományos, tisztán ausztenites szövetszerkezetű korrózióálló acélokkal szemben [3]. Ebből az okból kifolyólag a duplex acélok egyre nagyobb szerephez jutnak az ipari gyakorlatban, számos esetben különböző hegesztett szerkezetek alapanyagaként. Jellemző alkalmazási terület a különféle vastagfalú hosszvarratos csövek gyártása az olaj- és gázipar számára, amely során gyakran az elektronsugaras hegesztési

eljárásra esik a választás a nagy termelékenység, a nagyfokú rugalmasság, illetve az elérhető mély beolvasás miatt. Komoly kihívás azonban, hogy a fázisarány a hegesztés után jelentős módon eltolódik a ferrites szövetszerkezet irányába. Ennek oka az, hogy a duplex acélok kristályosodása ferrites; a ferrit-ausztenit allotróp átalakulás a lehűlés során, szilárd halmazállapotban, nagyságrendileg 1200 °C és 800 °C között megy végbe. Az elektronsugaras hegesztésre jellemző nagy energiásűrűség és az abból adódó gyors



a)



b)

1. ábra: Beraha-II marószerral láthatóvá tett zömmel ferrites szövetszerkezet (a) illetve elektrokémiai maratással láthatóvá tett króm-nitrid kiválások (b) [8]

lehűlés azonban nem biztosít elegendő időt az ausztenitképződés kívánt mértékben történő végbemenetelére [4]. Ezen túlmenően az elektronsugaras hegesztéshez alapvetően nélkülözhetetlen nagyvákuum hozzájárul a nitrogén hegfürdőből történő jelentős mértékű effúziójához [5-8]. A nitrogén erős ausztenitképző, annak csupán részleges elvesztése is jelentős mértékben csökkenti az ausztenitképződés mértékét. Ebből adódóan, amennyiben egyéb módon nem kerül sor a hegesztési folyamatba történő beavatkozásra, egy zömmel ferrites szövetszerkezet alakul ki jelentős mennyiségű króm-nitrid kiválással kísérve (lásd 1. ábra). En-

1. táblázat: Az alkalmazott alapanyagok és a hozaganyag kémiai összetétele

Alapanyag	Kémiai összetétel (wt. %)										
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Cu	N	Fe	Cr <sub>Eq</sub> *	Ni <sub>Eq</sub> *
1.4462 (15 mm)	0,026	22,8	5,48	1,29	0,34	3,07	0,20	0,183	Bal.	27,5	9,25
1.4462 (20 mm)	0,017	22,5	5,65	1,54	0,35	3,27	0,24	0,155	Bal.	27,5	8,94
1.4462 (30 mm)	0,019	22,3	5,01	1,55	0,38	3,21	0,11	0,176	Bal.	27,3	8,51
2.4607 (Huzal)	0,013	22,9	60,1	0,17	0,07	15,8	0,014	-	Bal.	44,6	60,4

\*Hammar & Svensson [18]

nek oka a ferrites fázis limitált nitrogénoldó képessége.

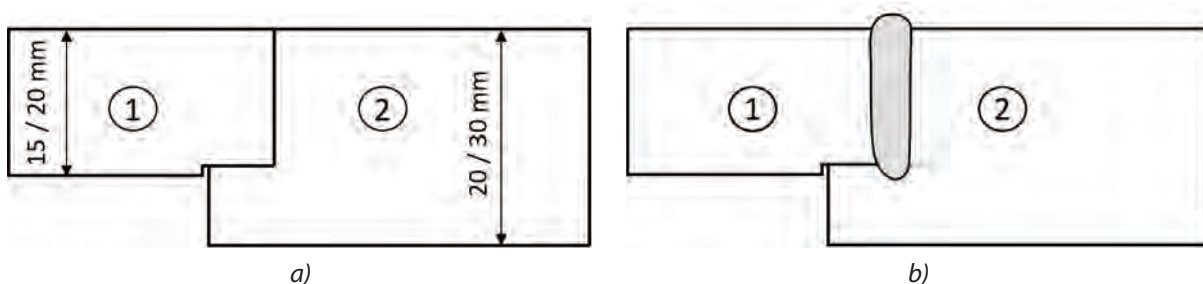
Míg a lézersugaras, illetve a különböző ívhegesztési eljárások során a védőgáz nitrogéntartalmának növelésével a nitrogén elvesztése, illetve az abból adódó zömmel ferrites szövetszerkezet kiküszöbölhető [9-15], az elektronsugaras hegesztési eljárás esetén más módszerekre van szükség, hiszen a vákuum szükségessége miatt védőgázok alkalmazása technikailag nem megvalósítható. Szakirodalmi források alapján a hegfürdő nikkellel való dúsítása a szövetszerkezet kiegyensúlyozásához vezet, amennyiben a hűlési viszonyok ezt lehetővé teszik [8, 16-17]. A kutatásunk célja a nikkelbázisú hozaganyagok alkalmazhatóságának vizsgálata volt a duplex acélok elektronsugaras hegesztése során. Elemeztük, hogy a huzal és az alapanyag jó elkeveredése – különösképpen nagy beolvadási mélységek mellett – milyen mértékben megy végbe. Ezen felül a kutatómunka az ily módon elkészített varratok szövetszerkezetének, illetve a mechanikai tulajdonságainak vizsgálatára irányult.

## 2. Kísérleti anyagok, berendezések és eljárások

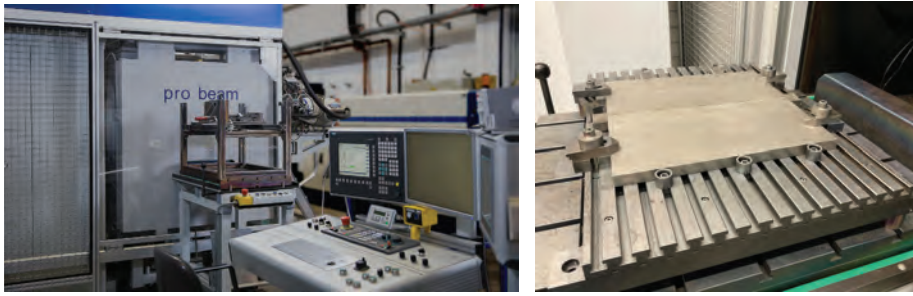
### 2.1 Alkalmazott anyagok és tulajdonságaik

A hegesztési kísérletek során kettő darab ráültetett tompakötést készítettünk el (lásd 2. ábra). Az egyik esetben a 15 mm és a 20 mm (1. hegesztési kísérlet), a másik esetben pedig a 20 mm és a 30 mm anyagvastagságú lemezek (2. hegesztési kísérlet) között hoztuk létre a hegesztett kötést. Ebből adódóan a gyökemegtámasztást a nagyobb falvastagsággal rendelkező alapanyag biztosítja. Az illeszkedő felületek forgácsolással kerültek megmunkálásra.

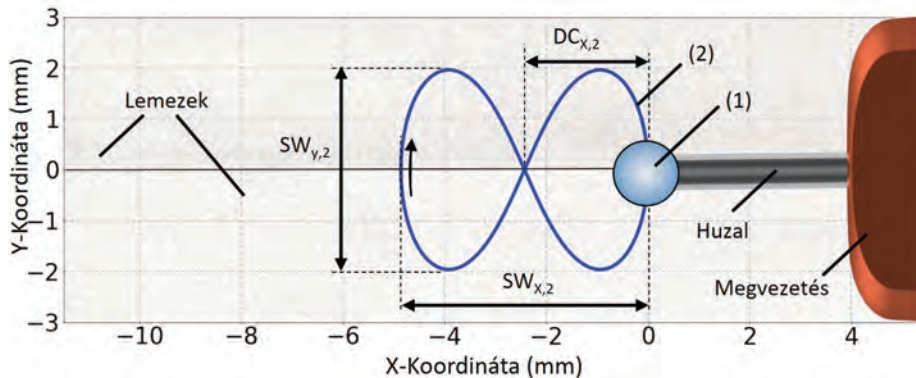
A felhasznált alapanyagok kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza. A nikkel reprodukálható és stabil adagolásának érdekében egy 1,0 mm átmérőjű nikkelbázisú hegesztőhuzalt (S Ni 6059 / NiCr-23Mo16 az EN ISO 18274 [18] szerint) alkalmaztunk, melyet jól automatizált módon, egy huzalelőtoló segítségével lehet a hegfürdőbe továbbítani.



2. ábra: A hegesztett kötések sematikus bemutatása hegesztés előtt (a), illetve hegesztés után (b)



3. ábra: A hegesztési kísérletekhez használt elektronsugaras hegesztőgép (a), illetve a lemezek készülékben való rögzítése (b)



4. ábra: Az alkalmazott hegesztési stratégia, illetve az elektronsugár oszcillációjának sematikus ábrázolása

## 2.2 Elektronsugaras hegesztés

A hegesztési kísérletek elvégzéséhez egy pro-beam K26-3 típusú, 15 kW maximális teljesítményű elektronsugaras hegesztőberendezést használtunk (lásd 3. ábra (a)). A 2,6 m<sup>3</sup> térfogatú munkakamrában a hegesztés megkezdése előtt egy minimum 2,5×10<sup>-3</sup> mbar minőségű nagyvákuumot hoztunk létre a veszteségek minimalálásának, illetve a reprodukálhatóság biztosításának céljából. A gyorsítófeszültség értéke 120 kV volt a kutatómunka teljes időtartama alatt. A próbadarabok rögzítéséhez egy általunk készített, hornyos szorítókkal és leszorító karmokkal ellátott készüléket használtunk, ahogy azt a 3. ábra mutatja.

Az első hegesztési kísérlet során az sugáráramot 80 mA-nek, a hegesztési sebességet pedig 6 mm/s-nak választottuk meg. A második kísérlet során a megnövekedett falvastagság miatt a hegesztési sebességet 4 mm/s-ra redukáltuk, a sugáráramot pedig 90 mA-ra növeltük. A hegesztési sebesség csökkentésének oka a huzal és az alapanyag elkeveredésére

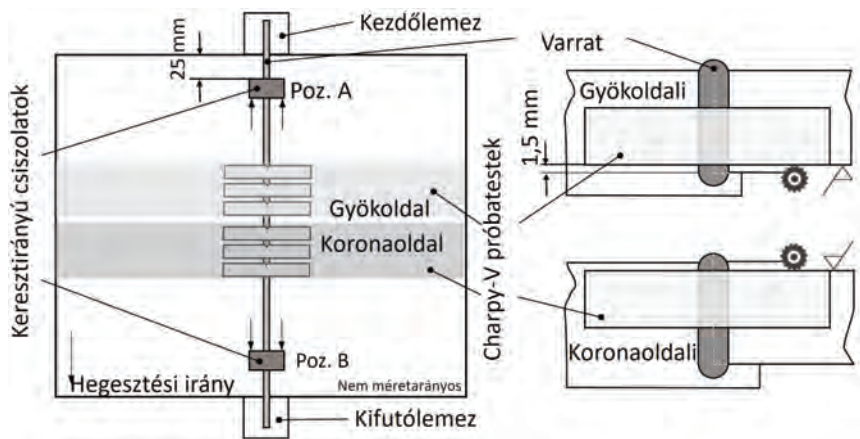
rendelkezésre álló idő növelése volt, mely a megnövekedett beolvadási mélység miatt szükségesnek mutatkozott. A huzalelőtölési sebességet az első kísérlet során 2,7 m/min-nek, a második kísérlet során pedig 3,2 m/min-nek választottuk meg.

A huzal megolvasztásának és a konkrét hegesztésnek a térbeli, de nem időbeli elválasztásához az elektronsugár gyakorlatilag tehetetlenség nélküli eltérítési lehetőségét használtuk ki. Szemben a lézersugaras hegesztéssel, ahol a lézersugár eltérítése tömeggel és tehetetlenségi nyomatékkal rendelkező tükrök segítségével történik, az elektronsugár eltérítése mágneses térrel megy végbe. Ennek sebessége a vezérlés konfigurációjától, illetve annak interpolációs ütemidejétől függ, de alapvetően nagyságrendekkel nagyobb, mint egy mechanikus eltérítés esetében. A hegesztési folyamatot így két részre osztottuk, amely periodikusan váltakozva, a hegesztés szempontjából gyakorlatilag szimultán megy végbe. Az első zónában (1) a huzal megolvasztása megy végbe egy +60 mm-es

defokuszálással (f), a teljes folyamatot tekintve az elektronsugár az idejének 10%-át tölti el itt. A második zónában (2) a konkrét hegesztési folyamat megy végbe a maradék időben (90%). A két zóna között az elektronsugár 10 kHz frekvenciával alternál ( $F_{\text{Vált}}$ ), ebből adódóan az elektronsugár egy periódust tekintve 0,01 ms-ot tartózkodik az első zónában, és 0,09 ms-ot a másodikban. Ez elég gyors ahhoz, hogy mind a huzal megolvasztása, mind pedig a hegesztési folyamat zavarmentesen menjen végbe, hiszen az ömledék tehetetlensége elég nagy ahhoz, hogy azt a rövid időre eltávolodó, majd visszatérő elektronsugár érdemileg ne befolyásolja. Ezen túlmenően a második zónában egy „fektetett nyolcas” alakú, 500 Hz frekvenciával rendelkező sugároszcillációt programoztunk (lásd 4. ábra), amely egyrészt a varrat kiszélesítésére, másrészt pedig az alapanyag és a hozaganyag közötti elkeveredés javítására szolgált. Ennek az oszcillációs alaknak a szélessége ( $SW_y$ ) az első kísérlet során 3,8 mm, a második kísérlet során 4,0 mm volt. Az oszcilláció hosszanti kiterjedése ( $SW_x$ ) mindkét esetben 5 mm volt.

## 2.3 Vizsgálati módszerek

A hegesztési kísérleteket követően a próbatestek forgácsoló megmunkálással történő kivétele történt meg. Az 5. ábrának megfelelően 1-1 keresztirányú csiszolatot munkáltunk ki a varrat kezdeti (Poz. A), illetve végző (Poz. B) szakaszából. Ezeket mikroszkópi vizsgálatokat, illetve energiadiszperzív röntgen elemvizisézt (EDS) végeztünk a szövetszerkezet és az azzal szoros összefüggésben lévő nikkeltartalom elemzése céljából. Továbbá három-három gyök-, illetve koronaoldali Charpy-V ütőpróbatestet munkáltunk ki az ábrának megfelelően. Ezen próbatestek esetében a bemetszés merőleges volt a lemez síkjára.



5. ábra: A vizsgálatokhoz kimunkált próbatetek helyzetei

A keresztirányú csiszolatokat a csiszolást és polírozást követően Beraha-II marószerrrel marattuk, amely a ferritet elszínezi, így lehetővé téve a fázisarány kontrasztkülönbségen alapuló automatizált kiértékelését. Csiszolonként összesen 15 darab (5 db a varrat koronaoldali, 5 db a varrat középső és szintén 5 db a varrat gyökoldali részéről) mikroszerkezeti képet készítettünk egy Leica DM4000M típusú mikroszkóp alkalmazásával, 500×-os nagyításban. Az így kapott képeket szürkeárnyalatosra (8 bit) konvertáltuk és egy adott küszöbérték alkalmazásával binarizáltuk. A Pyt-

hon programozási nyelvben írt szkript 6. ábrának megfelelően a küszöbértéktől kisebb szürkeárnyalat-értékű pixeleket sötétkékre, az annál nagyobb szürkeárnyalat-értékű pixeleket pedig sárgára színezi, majd azok egymáshoz viszonyított arányát kiszámítja (lásd 6. ábra). Az így kapott arány megfigyelhető a szövataránynak.

Az ausztenit-ferrit arány alapvetően szoros összefüggést mutat az adott pontban mérhető ausztenit-, illetve ferritképző elemek arányával, amely – különösen a nikkel esetében – közvetlenül függ az alapanyag és a hozaganyag elkeveredésétől. Az ausztenitképződés folyamatát szem előtt tartva azonban egyértelmű, hogy a hűlési viszonyok, illetve azoknak az inhomogenitása egy további befolyásoló tényezőként jelenik meg. Az elkeveredés egyéb befolyásoló tényezőktől mentes elemzése céljából EDS méréseket végeztünk a varrat középvonala mentén. Ezen méréseket egy eumeX detektorral felszerelt JSM-6480 elektronmikroszkóppal végeztük el. A mérések során állandó, 20 kV nagyságú gyorsítófeszültséget alkalmaztunk, és 500 μm × 500 μm felületű, egymástól 1 mm távolságra elhelyezkedő négyzet alakú területeket pásztáztunk le a varrat koronaoldalából kiindulva egészen a gyökoldal alatti alapanyag eléréséig.

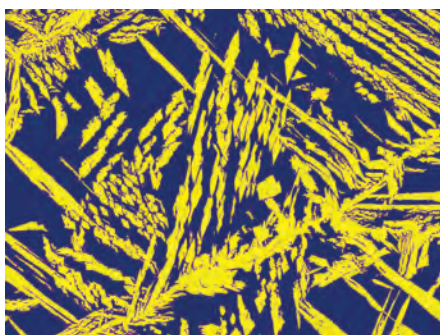
A keresztirányú csiszolatokon a mikroszerkezeti vizsgálatokon és az EDS elemvizsgálatakon kívül keménységméréseket végeztünk annak meg-

állapítása érdekében, hogy a szövet-szerkezetben látható inhomogenitás milyen mértékben tükröződik a keménységértékekben. A vizsgálatokhoz egy ZwickRoell típusú keménységmérő berendezést használtunk, Vickers-eljárást alkalmazva az ISO 6507-1 [20] szerint. A terhelőerőt 9,81 N-nak választottuk meg, így tehát a mért értékeket HV1-ben kaptuk meg. Az ezen terhelés mellett kapott lenyomatok elegendően kicsik az alapvetően keskeny hőhatásövezet és a varrat kellő mértékű felbontásához, de elegendően nagyok egy stabil átlagérték szolgáltatásához. Így a kapott keménységérték nem az egyes fázisok (pl.: egy nagyobb ferritszemcse) véletlenszerű eltalálásától függ. A lenyomatok közötti távolság 250 μm volt, az optikai kiértékelést 400×-os felbontásban végeztük el.

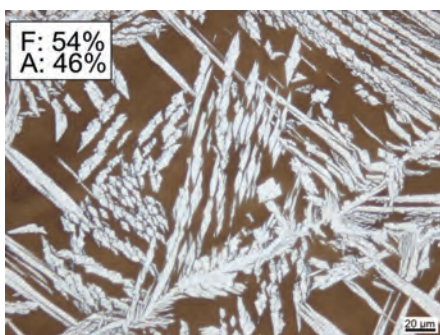
A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatokat walter+bai AG PH-300 típusú, 450 J maximális kinetikus energiával rendelkező ütőmű segítségével végeztük el. A V-bemetszésű próbatetek keresztmetszete 10 mm × 10 mm volt. Az ISO 17781 [21] szabványnak megfelelően a vizsgálati hőmérsékletet -46 °C-nak választottuk meg, amelyet egy huber CC 902 temperáló berendezéssel, metanol fürdőben állítottunk be. Az ISO 17781 szabvány a duplex acélok esetében ezen hőmérsékleten legalább 50 J átlagos minimális ütőmunkát követel meg.

### 3. Eredmények és kiértékelésük

A kiértékelés első szempontja a varratgeometria, illetve a varrat és a hőhatásövezet szövetszerkezete volt, amelyeket a 7. ábra mutatja be. A varratgeometriát mindkét esetben párhuzamos beolvadási vonalak jellemzik. Ez a sajátosság – kiváltképpen az elektronsugárral hegesztett varratokra alapvetően jellemző kis nyílásszögű, V-alakkal szemben – az alapanyag és a hozaganyag elkeveredése szempontjából különösen előnyös. Az elektronsugár trajektóriájának

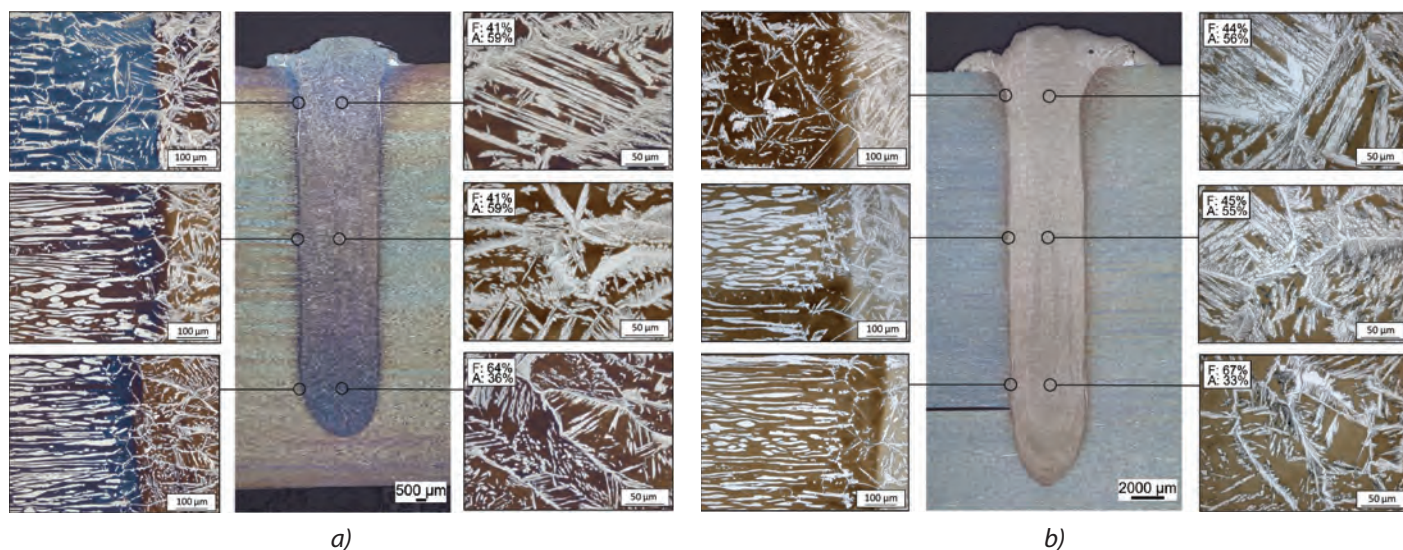


a)



b)

6. ábra: Egy binarizált (a) és egy kiértékelte szövetszerkezeti felvétel (b)



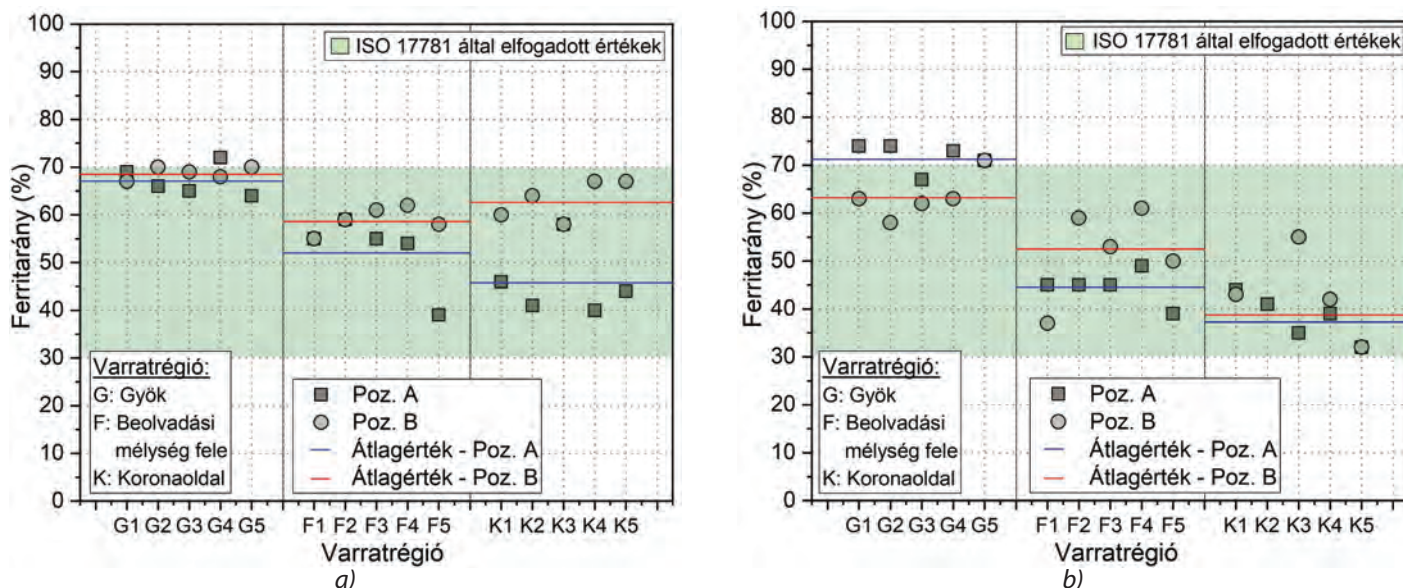
7. ábra: A varratgeometria és a szövetszerkezet a hőhatásövezetben, illetve a varratban (a: 1. hegesztési kísérlet; b: 2. hegesztési kísérlet)

– mely az oszcilláció és a hegesztési sebesség szuperpozíciójából adódik – a varrat középvonalára vett szimmetriájából adódóan az energiabevitel is szimmetrikus, amely a varrat geometriájában is visszatükröződik. A szövetszerkezetet szemügyre véve megállapítható, hogy a nikkel hozzáadása a varrat minden pontjában elősegítette az ausztenitképződést. Mindkét kísérletre jellemző, hogy a koronaoldal, illetve a varrat középső régiója 50-60% ausztenitet tartalmaz, míg a gyökoldal ausztenittartalma 30-40% között van. A hőhatásövezet a varrat gyökoldali és középső régiójában mindkét esetben 50-100 µm szé-

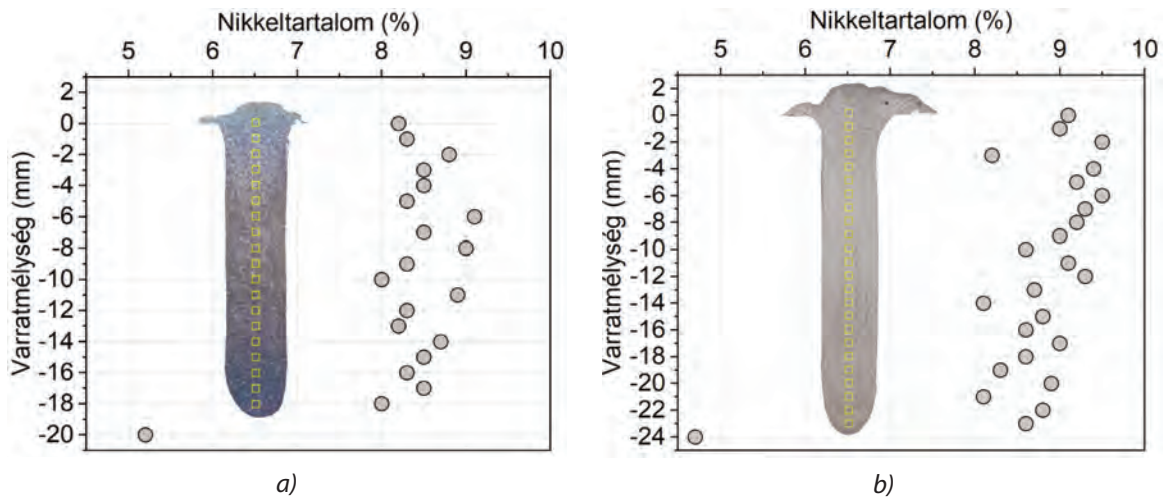
lességű. A koronaoldalon megfigyelhető a hőhatásövezet kiszélesedése. Az 1. hegesztési kísérlet során kapott varrat esetében a koronaoldalon egy körülbelül 200-250 µm szélességű, durvaszemcsés, zömmel ferrites zóna alakult ki. Hasonló jelenség figyelhető meg a 2. kísérlet eredményeinek elemzésekor, azzal a különbséggel, hogy az 1. kísérlethez képest megnövelt energiabevitel a hőhatásövezet további szélesedését vonta maga után. Ebben az esetben a hőhatásövezet szélessége 300-350 µm volt. Továbbiakban mindkét esetben megfigyelhető a varrat koronaoldalán egy általános hidegkötés, amely a kulcslyukból kiáramló,

részben már elkeveredett, de zömében nikkelben gazdag ömledék és az alapanyag felszíne között jött létre. A későbbi alkalmazás során esetlegesen bekövetkező réskorrózió elkerülésének érdekében ezt a hidegráfolyást forgácsoló eljárással el kell távolítani. Alternatív megoldást jelenthet a teljes koronaoldal volframelektrodás védőgázos hegesztéssel, vagy pedig magával az elektronsugárral történő újraolvasztása.

A mért ferritarányokat az adott varratrégió függvényében a 8. ábra mutatja be. Az 1. hegesztési kísérlet a varrat végéhez közel eső (Poz. B) mintáját leszámítva mindkét esetben



8. ábra: A ferritarány a varratrégió függvényében (a: 1. hegesztési kísérlet; b: 2. hegesztési kísérlet)



9. ábra: A nikkel eloszlása a varrat középvonala mentén  
(a: 1. hegesztési kísérlet; b: 2. hegesztési kísérlet)

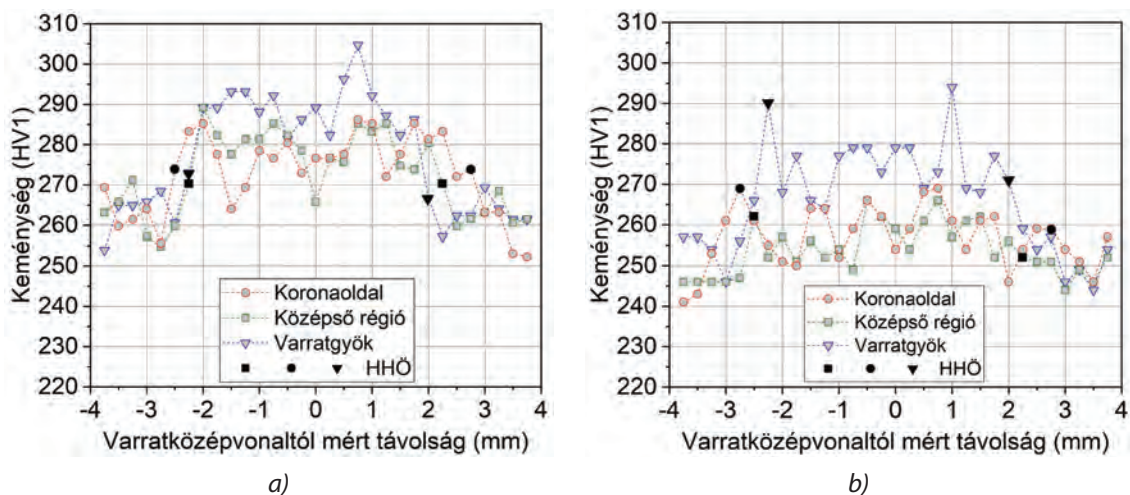
jól megfigyelhető a koronaoldal felé haladva egy csökkenő trend a ferritarányt illetően. A gyökoldal átlagos ferrittartalma az első kísérlet során 67% és 69% közé esik, a második kísérlet során ez az intervallum 64% és 71%. A második kísérlet esetében, a varrat kezdeti szakaszának (Poz. A) gyökoldali régiója szórványosan nagyobb ferrittartalmú (72-74 %) zónákat is tartalmaz. A varrat középső régiója, mind az első, mind pedig a második kísérlet során kiegyensúlyozott szövetszerkezet tudhat magáénak, ahol az átlagos ferrittartalom 45% és 58% között van. Egyes mérési pontokban a ferritarány meghaladja a 60%-ot, más esetekben alulmúlja a 40%-ot, azonban semelyik esetben nem hagyja el az ISO 17781 által megkövetelt intervallumot (30-70%).

A koronaoldal az 1. kísérlet a varrat végéhez közel eső (Poz. B) mintájától eltekintve zömmel ausztenites. A 2. kísérletben kapott varrat koronaoldali része mind a varrat elején, mind pedig a varrat végén zömmel ausztenites, az átlagos ferritarány ebben a régióban 36-38%. A gyökoldal nagyobb ferrittartalmának oka egyrészt annak a koronaoldalhoz és a középső régióhoz viszonyított alacsonyabb nikkel tartalmára, másrészt pedig a gyorsabb hűlésére vezethető vissza.

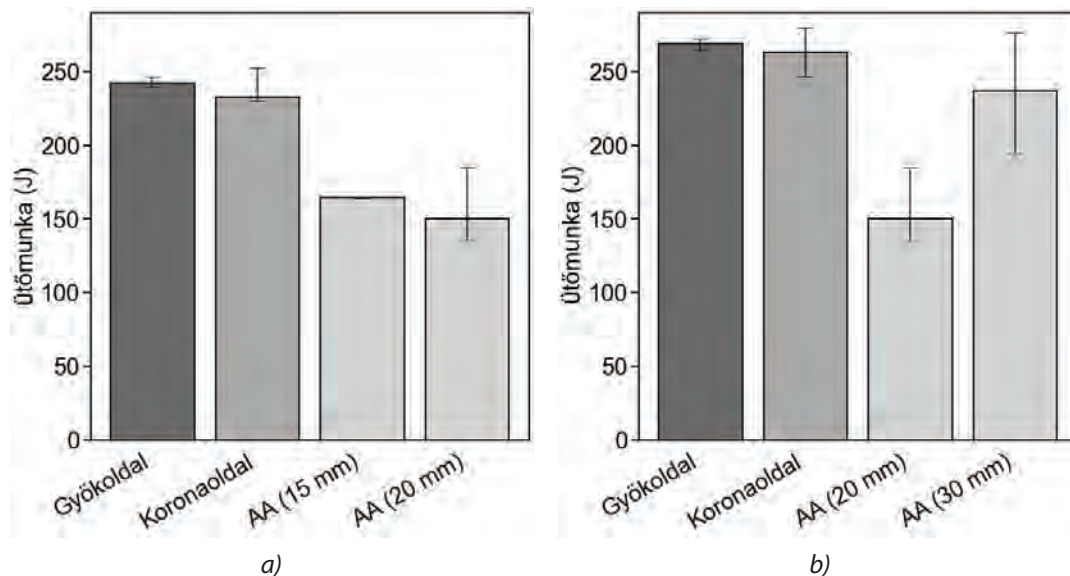
A varrat középvonala mentén elhelyezkedő lépasztázott területek átlagos nikkel tartalmát a 9. ábra szemlélteti. Az alapanyagok 5-5,5%-os nikkel tartalmához képest a varrat teljes egészében jól megvalósult a nikkel tartalom célzott növelése. Mind az 1., mind pedig a 2. hegesz-

tési kísérlet esetében látható, hogy a nikkel tartalom a gyökoldal felé haladva csökkenő tendenciát mutat. Ez a jelenség a 2. hegesztési kísérlet esetében fokozottan megfigyelhető. Ebben az esetben a koronaoldal átlagos nikkel tartalma 9 és 9,5% között mozog, szemben a gyökoldal 8% és 9% közötti nikkel tartalmával. Ennek az inhomogenitásnak oka, hogy a nikkel hozzávezetése a koronaoldal felől történik, annak az alapanyaggal való tökéletes elkeveredésére – tekintettel a beolvadási mélységre – nem áll rendelkezésre elegendő idő. Ezt továbbiakban jól alátámasztja a mért értékek szórása is, mely a nikkelben gazdagabb, illetve szegényebb régiók váltakozására enged következtetni.

A csiszolatokon az EDS vizsgálatok elvégzése után keménységvizsgálá-



10. ábra: A HV1 keménység a varratközépvonaltól mért távolság függvényében  
(a: 1. hegesztési kísérlet; b: 2. hegesztési kísérlet)



11. ábra: Az ütőmunka a varrat gyök-, illetve koronaoldali régiójában (a: 1. hegesztési kísérlet; b: 2. hegesztési kísérlet)

tot végeztük. A 10. ábra az 1. kísérlet varrat kezdetéhez közeli, illetve a 2. kísérlet varrat végéhez közeli csiszolatokon mért keménységértékeket mutatja be. A keménységet tekintve nem tapasztaltunk érdemi különbséget a varrat kezdeti és végső szakasza között. Szintén elhanyagolható a különbség a két hegesztési kísérlet között. A keménységeloszlásokból látható, hogy a varrat gyökoldala az 1. kísérlet során 280-300 HV1, a 2. kísérlet során pedig 270-290 HV1 körüli értékre keményedik. Megfigyelhető továbbá, hogy a koronaoldal, illetve a varrat középső tartományának keménysége elmarad a gyökoldal keménységétől, de meghaladja az alapanyagokra jellemző értékeket. Az API TR 938-C [22] által definiált maximális megengedhető keménység (320 HV) semelyik esetben sem került átlépésre.

A 11. ábra a Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok során a varrat különböző régióiban kapott ütőmunka értékeit mutatja be. Referenciaképpen a három alapanyagra (AA) jellemző ütőmunkát is feltüntettük. Jól látható, hogy mind a gyökoldal, mind pedig a koronaoldal szívóssága meghaladja az alapanyagra jellemző értéket. Ez az ISO 17781 szabványban megfogalmazott követelmények (átlagértékek minimuma: 50 J) jelentős túlteljesí-

tését vonta maga után. Ez egyrészt a kiegyensúlyozott szövetszerkezetre, másrészt pedig a megnövelt nikkeltartalomra vezethető vissza. Érdemi eltérést a gyökoldal és a koronaoldal ütőmunkáját tekintve nem tapasztaltunk. Korábbi kutatómunkánk során referenciaként egy 85-90% ferritárnyú varratot vizsgáltunk, amely hasonló technológiai változókkal, azonban hegesztőhuzal alkalmazása nélkül készült el [8]. Az így kapott ütőmunka 20-25 J volt, amely az ISO 17781 szabvány követelményeit nem elégítette ki. Tekintettel erre az eredményre kijelenthető, hogy a nikkeltartalom alkalmazása az ütőmunkát nagyságrendileg a tízszeresére növelte.

## 5. Összefoglalás

A kutatómunka során standard duplex acélemezek elektronsugaras hegesztését végeztük el nikkeltartalmú hegesztőhuzal használatával. A hegesztési kísérletek, illetve az azt követő anyagvizsgálatok alapján összefoglalásként az alábbi megállapítások fogalmazhatóak meg:

- Az elektronsugár „fektetett nyolcas” alakban történő oszcillációja, illetve az ebből adódó komplex teljesítményeloszlás eredményeképpen egy viszonylag széles hegesztési varratot hoztunk létre, amely elősegítette a nikkeltartalmú huzal

elkeveredését és kiegyenlítette az előkészítésből adódó esetleges geometriai pontatlanságokat.

- A nikkeltartalom 4-5%-kal történő megnövelésével kiegyensúlyozott szövetszerkezet alakult ki. Az nikkeltartalom eloszlásában ugyan megfigyelhető némi inhomogenitás, összességében azonban egy jó elkeveredés valósult meg a huzal és az alapanyag között.
- A varrat keménysége körülbelül 20-30 HV1-el haladja meg az alapanyag keménységét, de nem éri el az API TR 938-C által definiált maximálisan megengedhető keménységet (310 HV). A varrat gyökoldali részének keménysége ezen túlmenően átlagosan 10-20 HV1-el nagyobb, mint a koronaoldali és a középső régió keménysége. Ez a gyökoldal alacsonyabb nikkeltartalmának, gyorsabb hűlésének és az ebből következő nagyobb ferrit-tartalmú szövetszerkezetének köszönhető.
- Köszönhetően a kiegyensúlyozott szövetszerkezetnek és a megnövelt nikkeltartalomnak a varrat nagy szívóssággal rendelkezik.

A jövőbeni terveink között szerepel többek között kulcslyukban végbemenő folyamatok részletesebb tanulmányozása – nagysebességű képpalkotó rendszerek használatával –

az alapanyag és a hozaganyag közötti elkeveredés alaposabb megértésének érdekében. Ezen túlmenően célunk a nikkelbázisú hozaganyag, illetve az oszcillált sugár alkalmazásán alapuló technológia átültetése lézersugaras hegesztési folyamatokba.

## Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani a szövetségi gazdasági és környezetvédelmi minisztériumnak (Bundestministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) az IGF: 20.622 N projekt finansziális támogatásáért. A próbatetek előkészítéséért és az anyagvizsgálatok elvégzéséért köszönet illeti a Technische Universität Braunschweig – Institute of joining and welding technikai munkatársait. Ezen túlmenően a szerzők köszönet mondának Dr. Varbai Baláznak (BME-ATT), Dr. Elin Westinnek (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH), Sergii Krasnorutskyinak (pro-beam GmbH & Co. KgaA), Michael Müllernek (GWQ GmbH & Co. KG) és Harald Winkingnek (Heinz Gothe GmbH & Co. KG) a duplex acélok hegesztéséhez kapcsolódó szakmai konzultációért. Köszönet illeti továbbá az Outokumpu Nirosta GmbH munkatársait, különösképpen Dr. Ali Agjananit, illetve Dr. Gabriele Brücknert az alapanyagokért. Ezen felül szeretnénk megköszönni Marco Steinnak (SFG Schweißtechnik Fachhandel Gubelas GmbH) a nikkelbázisú hegesztőhuzal rendelkezésre bocsátását.

## Irodalomjegyzék

- [1] Lippold JC., Kotecki D. J. „Welding metallurgy and weldability of stainless steels” John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, pp 230–234, 2005
- [2] Gunn R. N., „Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications” Abington Publishing, pp 1-2, 1997
- [3] Westin E. „Microstructure and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX 2101” Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, pp 3–5, 2010
- [4] Ku JS, Ho NJ, Tjong SC „Properties of electron beam welded SAF 2205 duplex stainless steel” J Mater Process Technol, 63(1) pp. 770–775., 1997
- [5] Krasnorutskyi S., Keil D., Schmigalla S., Zinke M., Heyn A., Pries H. „Metallurgical investigations on electron beam welded duplex stainless steels” Welding in the World 56:34–40., 2012
- [6] Schmigalla S., Krasnorutskyi S., Zinke M., Heyn A. „Corrosion behavior of electron beam welded duplex stainless steels” Mater Corros 66(5):442–452, 2014
- [7] Krasnorutskyi S., Pries H., Zinke M., Keil D. „Metallurgical influence of multi-beam technology on duplex stainless steel welds” Welding in the World 57:487–494., 2013
- [8] Tóth T., Krasnorutskyi S., Hensel J., Dilger K. „Electron beam welding of 2205 duplex stainless steel using pre-placed nickel-based filler material” Int J Press Vessels Pip. 191:104354.
- [9] Keskitalo M., Mäntyjärvi K., Sundqvist J., Powell J., Kaplan AFH „Laser welding of duplex stainless steel with nitrogen as shielding gas” J Mater Process Technol 216:381–384., 2015
- [10] Pamuk S., Sojiphan K. „Effects of argon-nitrogen backing gas ratios on microstructure and corrosion resistance of duplex stainless steel pipe ASTM A790 welds by gas tungsten arc welding process” Materials Today: Proceedings, vol. 5, 3. Part 2:9512–9518., 2018
- [11] Reyes-Hernández D., Manzano-Ramírez A., Encinas A., Sánchez-Cabrera VM., Jesús ÁM., García-García R. „Addition of nitrogen to GTAW welding duplex steel 2205 and its effect on fatigue strength and corrosion” Fuel 198:165–169., 2017
- [12] Zhang Z., Jing H., Xu L., Han Y., Zhao L., Zhou C. „Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint” Appl Surf Sci 404:110–128., 2017
- [13] Varbai B., Pickle T., Májlinger K. „Effect of heat input and role of nitrogen on the phase evolution of 2205 duplex stainless steel weldment” Int J Press Vessels Pip 176:103952., 2019
- [14] Varbai B., Májlinger K. „Physical and Theoretical Modeling of the Nitrogen Content of Duplex Stainless Steels Weld Metal: Shielding Gas Composition and Heat Input Effects Metals” (Basel) 9 762, 2019
- [15] Varbai B., Májlinger K. „A nitrogén szerepe duplex acélok ívhegesztésekor” Hegesztéstechnika, 30 (3), pp. 63–67, 2019.
- [16] Wu HC., Tsay LW., Chen C. „Laser beam welding of 2205 duplex stainless steel with metal powder additions” ISIJ Int 44(10):1720–1726, 2004
- [17] Strasse A., Gumenyuk A., Rethmeier M. „Quality improvement of laser welds on thick duplex plates by laser clad buttering” Proceedings of the Laser in Manufacturing Conference, Munich, Germany, 2019
- [18] ISO 18274:2010 Welding consumables - Solid wire electrodes, solid strip electrodes, solid wires and solid rods for fusion welding of nickel and nickel alloys – Classification
- [19] Hammar O. S. U „Influence of steel composition on segregation and microstructure during solidification of austenitic stainless steels. Solidification and casting of metals” 1979
- [20] ISO 6507-1:2018, Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method
- [21] ISO 17781:2017, Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Test methods for quality control of microstructure of ferritic/austenitic (duplex) stainless steels
- [22] API Technical Report 938-C: Use of Duplex Stainless Steels in the Oil Refining Industry, 2011