



SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM

Anyagtudományi és Technológiai Tanszék

TDK DOLGOZAT

**S355N szerkezeti acél tulajdonságjavító felrakó
hegesztésének tapasztalatai**

Szerző:

Légmán Nikoletta

Gépészmérnöki mesterszak I. évf.

Tanszéki mérnök, ATT

Konzulens:

Dr. Tancsics Ferenc

egyetemi docens

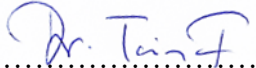
Győr, 2022

Nyilatkozatok

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Széchenyi István Egyetem Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

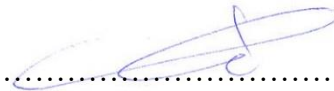
A beadás időpontja: 2022.11.04.


.....
konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Légmán Nikoletta (Y6ZPRA) a Széchenyi István Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Győr, 2022.11.04.


.....
hallgató

Tartalomjegyzék

Előszó.....	3
Köszönetnyilvánítás	3
Absztrakt	4
Summary	5
1. Bevezetés.....	6
2. Irodalmi áttekintés.....	8
2.1. Korrózió.....	8
2.2. Ötvöztelen szerkezeti acélok	9
2.3. Korrózióálló acélok	11
2.4. Ausztenites korrózióálló acélok ötvözői.....	12
2.4. Ausztenites korrózióálló acélok felrakóhegesztése	15
2.5. Ferrittartalom meghatározása	17
3. Kísérleti munka	19
3.1. Hegesztő berendezés.....	19
3.2. A technológia jellemzői.....	19
3.3. Kísérleti próbatest.....	26
3.4. Vizsgálatok	26
3.4.1. Makro-és mikroszkópos vizsgálat a sópermet vizsgálat előtt.....	28
3.4.2. Keménységmérés	31
3.4.3. Sópermet vizsgálat	32
3.4.4. Mikroszkópos vizsgálat a sópermet vizsgálat után	33
3.4.5. Elektronmikroszkópos vizsgálat	34
4. Eredmények.....	49
5. Összefoglalás.....	50
Irodalomjegyzék.....	51
Ábrajegyzék	52

Előszó

A GINOP-2.2.1-18-2020-00027 számú projekt keretein belül és a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékének támogatásával lehetőségem nyílt egy kutatócsoportban részt venni, és különböző robothegesztési technológiák és ezzel kapcsolatban különböző acélkombinációk hegesztett kötéseinek minősítő vizsgálataival foglalkozni. Egy ultrakönnyű olajkitermelő egység hegesztési feladatai során szükséges hegesztéstechnológiai fejlesztésekhez kapcsolódva ismerkedtem meg mélyebben a hegesztési területen belül a hegesztett kötések minőségi elvárásaival és vizsgálati módszereivel. Kollégáimmal és a projektben résztvevő konzorciumi tagokkal arra a megállapításra jutottunk, hogy az ultrakönnyű olajkitermelő egységnek nagy előnye a mobilizálhatósága, nem igényel annyi telepítési időt és előkészületet, mint a hagyományos kitermelő egységek telepítése, ezért tekintettel napjaink energiaigényességére az általunk javasolt új megoldás megfelelő válasznak mutatkozik. A projektben az anyagvizsgálatokkal foglalkoztam és eközben megszerettem azt az igényességet, amit megkövetel a hegesztett kötések vizsgálata. Felkeltette érdeklődésemet a különböző kötések során az anyagszerkezet átalakulásaiban rejlő lehetőségek sokszínűsége. Ez adott motivációt és ihletet jelen dolgozatom megírásához. Úgy gondolom, hogy a hegesztéstudomány egy kimeríthetetlen lehetőségeket magába foglaló terület, amellyel a legkülönbözőbb problémákra is megoldást találhatunk. Hosszútávú célom, hogy minél szélesebb körű ismeretanyagra tegyek szert ebben a tudáshalmazban.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni a fáradhatatlan támogatást és segítséget a dolgozat kivitelezésében Dr. Tancsics Ferenc konzulensemnek, akihez bármikor fordulhattam szükség esetén. Hála az Anyagtudományi és Technológiai Tanszék munkatársait, kollégáimat, többek között Varga Lászlót, a próbatestek elkészítéséért és a kutatáshoz nyújtott szellemi támogatásért. Köszönöm a sópermet vizsgálatban nyújtott segítséget Ibriksz Tamás kollégámnak, valamint a szakmai támogatást Pék Dezső kollégámnak.

Szeretném megköszönni az Anyagtudományi és Technológiai Tanszék vezetőségének, hogy használatra bocsátották a tanszéki mérőeszközöket és felszereléseket. Végül, de nem utolsósorban szeretnék köszönetet mondani családomnak a türelemért és a támogatásért, amivel hozzájárultak a dolgozatom elkészültéhez.

Absztrakt

Dolgozatomban az S355N szerkezeti acél tulajdonságjavító felrakó hegesztésének tapasztalatait tárom fel. Kutatásomban elsősorban arra keresek választ, hogy a felrakó hegesztés technológiai előnyei hogyan vehetők figyelembe a hagyományos alapanyagokból készülő alkatrészek élettartam növelésének és alkalmazhatóságának tervezésekor.

A környezeti hatásoknak kitett szerkezetek esetén az élettartam növelése elsősorban az abrazív és kémiai korrózióknak kitett felületeken válhat szükségessé. Az alkalmazott acél az olajkitermelő egység alapanyagra vonatkozó igényeit tekintve megfelelő szilárdsága mellett, a fenti igénybevételekkel szemben támasztott elvárásokat csak részben teljesíti. Az ipari gyakorlatban számos alkalmazási területen találkozunk olyan alkatrészekkel, amelyek működő felületeinek eltérő igénybevételnek kell megfelelniük.

Vizsgálataimnak az a célja, hogy átfogó képet kapjak az S355N alapanyagon végzett korrózióálló bevonatok felrakó hegesztésének technológiai előnyeiről. Szűkebb vizsgálati területeimet a porbeles huzalelektródás, védőgázos robottechnológiával végzett kísérletek képezték. Kutatásaim során részletes kimutatást készítettem az adott vizsgálati rendszerhez tartozó felrakó hegesztés alkalmazásának előnyeiről, és technológiai feltételeiről is.

Kísérleteim elsősorban anyagtakarékos és megbízhatóan működő növelt korrózióállóságú termék hegesztési technológiáját behatóan minőségügyi feltételrendszer kidolgozására irányultak.

Summary

In present work, I investigate the overlay welding of the structural steel S355N. It was examined how the technological advantages of overlay welding can be taken into account when planning to increase the service life and applicability of components made from traditional materials.

Increasing the service life of structures exposed to environmental influences is essential, especially on surfaces exposed to abrasive and chemical corrosion. Steel S355N has adequate strength for the requirements of the oil extraction unit, however it only partially fulfills the above mentioned requirements. In the industry, working surfaces of the structures must meet different demands

The aim of the investigation is to present a comprehensive picture of technological advantages of the corrosion-resistant overlay welding on steel S355N. I mainly examined the experiments of powder-coated wire electrode, protective gas robot technology. A detailed report was presented on the advantages and technological conditions of the application of overlay welding.

The aim of this paper was to develop a welding technology of a reliably functioning product with increased corrosion resistance.

1. Bevezetés

Számos alkatrésszel szemben elvárás, hogy belső szövetszerkezete szívós, míg felülete kopásálló, és-vagy korrózióálló legyen. Továbbá előfordul, hogy egy adott alkatrész a hosszabb-rövidebb időtartamon keresztül ható igénybevételek miatt károsodást szenved, esetleg tönkre megy. Ezek a problémák többek között felrakó hegesztéssel optimálisan orvosolhatók.

A felrakó hegesztéstechnológia tagadhatatlan előnye, hogy bármely kötőhegesztésre alkalmas eljárással kivitelezhető. Korunk állandósult energiagazdálkodási nehézségeit szem előtt tartva egyre nagyobb szerep jut ennek a területnek az iparban.

A különböző alkatrészek felrakóhegesztése során kiemelten fontos szempont a gazdaságosság, hiszen a megfelelő hegesztőanyag és a technológia megválasztásával hosszú élettartamot biztosíthatunk az adott terméknek. A hegesztett szerkezetek élettartamát számos tényező befolyásolja, többek között a környezeti hatások, üzemi hőmérséklet, a szerkezeten belül tárolt közeg, stb. Ezen tényezők alapos mérlegelést követelnek, hiszen az anyag komoly károsodást szenvedhet, amely súlyos következményekkel járhat.

Fontos szempontrendszer az ún. „*matching*”, ahol az alapanyag és hozaganyag összehangolása, ezen belül a szilárdság szerinti megfeleltetés az alapvető célkitűzés. Tehát a lehető legnagyobb homogenitással rendelkező hegesztett kötést próbálják létrehozni. Bizonyos esetekben jóval nagyobb szilárdságú, „*overmatching*” hozaganyaggal hegesztenek, amely heterogén szövetszerkezetet eredményez, azonban ilyen eseteknél mindig számolni kell a maradó feszültségek problémakörével. [1]

Tekintettel arra, hogy melegalakított acélok hegesztésénél a felrakott réteg összetétele az alapanyagétól jelentősen eltér, olyan technológiai paraméterek megválasztására kell törekedni, amelyekkel az alapanyag részaránya a varratban csökkenthető. A technológia kidolgozásához elengedhetetlen az alapanyag és a hegesztőanyag összetételének és keveredési folyamatainak ismerete. Kutatásomban S355J2N szerkezeti acél többretegű, erősen ötvöztött, korrózióálló ausztenites hozaganyaggal történő felrakóhegesztését vizsgáltam. Mivel egy merőben eltérő összetételű és tulajdonságú hozaganyaggal hegesztettünk, szükség volt egy közbenső, ausztenites hozaganyaggal készített réteg kialakítására, amelyet párnarétegnek is nevezünk. [2]

10% Cr tartalom esetén enyhe korrózióállóság áll fenn, de 12% Cr tartalom felett már ipari korrózióállóságról beszélhetünk. Munkámnak fontos része volt megvizsgálni, hogy az ötvözetlen szerkezeti acéllemez síkja felett hogyan alakul a különböző rétegek és keveredési zónáik Cr és Ni tartalma, és megállapítani, hogy milyen mélységtől beszélhetünk (mérsékelt, közepesen, és magasan) korrózióálló réteg kialakításáról. További feladatomból volt egy adott hegesztői rendszer esetén valamilyen kapcsolatrendszer megállapítása a korrózióállóság elvárt foka és a felrakott rétegvastagság közti kapcsolat későbbi optimalizálására.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Korrózió

A környezet hatására kialakult kémiai reakció miatt bekövetkezett és a felületről kiinduló tönkremenetelt korrózióknak nevezzük. A korróziós károsodás veszélyéről különböző vizsgálatokkal kapunk képet. Hegesztett kötések esetében az egész szerkezetre vonatkozó elvárás a korrózióállóság. A rozsdásodás az adott alkalmazásra rendelt hegesztett szerkezet azonnali, vagy rövid időn belüli funkcionális jellemzőinek romlását okozza, amely általában nem javítható, így komoly gazdasági veszteségek keletkeznek (pl. a korrodált alkatrész, berendezés javításának, kicserélésének költségei, üzemkiesés, plusz kiadások a megelőzés érdekében, stb.). [3]

A sok esetben agresszív ipari környezet megköveteli az acél- és egyéb vasalapú ötvözetekből készült szerkezetek korrózióállóságát. Ez gondosan megválasztott technológiai paraméterekkel optimálisan kivitelezhető, de léteznek korrózióvédelemre alkalmas felületkezelő anyagok és bevonatrendszerek is. [4]

A korrózió lehet egyenletes, bemarkódásos (pl. pitting, más néven lyukkorrózió), szövetszerkezeti, repedéses, vagy réteges. A szövetszerkezeti korrózióon belül beszélhetünk szelektív és kristályhatár menti (interkristallin) korrózióról. Utóbbi esetében a szemcsehatárokon korrozívabb fázis válik ki, mivel az ötvöző-, és szennyező elemek a szemcsehatáron dúsulnak, így a határréteg veszíti a fémre jellemző tulajdonságaiból. [3, 5]

A hegesztés korróziós szempontból károsan befolyásolja a szerkezeti anyagot, mivel szövetszerkezeti változásokat idéz elő, jelentős maradófeszültségek keletkeznek a hegesztés környezetében, továbbá a belső hibák, felületi szennyeződések a korróziós folyamatok melegágyai lehetnek. [3] A hőkezelés, az üzemi hőmérséklet és feszültségek is komoly befolyást gyakorolnak a hegesztett kötés korrózióállóságára. [6]

2.2. Ötvözetlen szerkezeti acélok

Az ötvözetlen szerkezeti acélok rendkívül széleskörűen alkalmazott acéltípusok, melyeket felhasználási területük alapján elsősorban állandó, vagy időben változó mechanikai igénybevételeknek kitett hegesztett kötésekben használnak. Népszerűségüket kedvező mechanikai tulajdonságaiknak, olcsó és változatos formában történő előállításuknak, valamint nagy alakváltozó képességüknek köszönhetik. Az iparban gyakran előfordul, hogy ha az igénybevételekkel szembeni követelmények lehetővé teszik, az anyagköltségek minimalizálása érdekében ezzel az acélcsoporttal helyettesítik a drágább acéltípusokat. Hegesztés szempontjából kiemelt fontosságú, hogy hegesztésük nem feltétlenül igényel előmelegítést az alacsony széntartalmuknak köszönhetően ($C < 0,2\%$), így kizárt a beedződés és ezáltal az edződési repedés veszélye. [7, 8]

A melegen hengerelt, ötvözetlen szerkezeti acélok jellemzőit az MSZ EN 10025-2:2020 szabvány foglalja össze. Az S jelöléssel ellátott acélminőségek kis karbontartalommal rendelkeznek, és maximum 0,55% szilíciumot tartalmaznak. A dolgozat szempontjából fontos S355J2N acéltípus vegyi összetétele az 1. számú táblázatban található. [9] Az N jelölés az acél normalizált állapotát jelöli. Normalizálás során finomszemcsés szerkezet keletkezik, amely megváltozott szilárdsági jellemzőket eredményez.

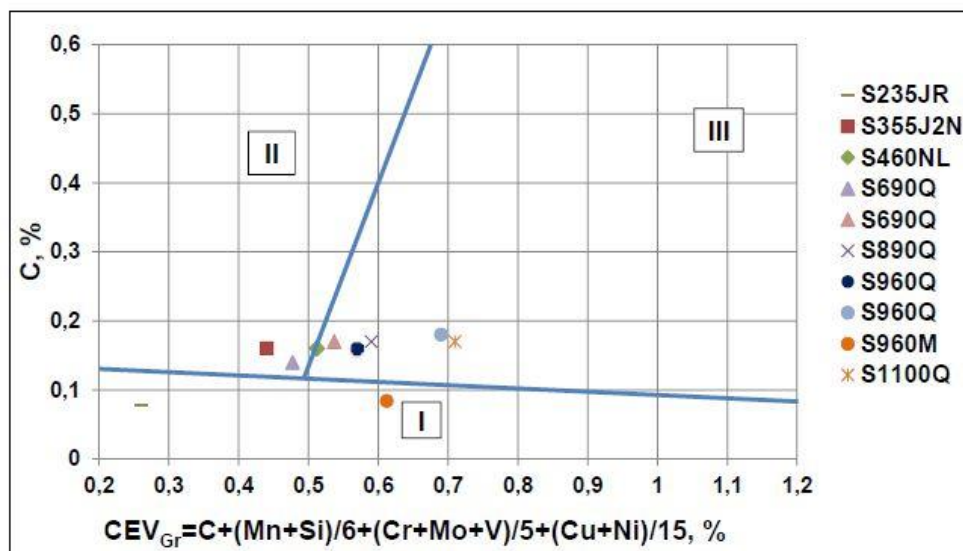
1. táblázat: S355J2N szerkezeti acél vegyi összetétele [9]

		C	Si	Mn	P	S	Cu	Egyéb
		% max.	% max.	% max.	% max.	% max.	% max.	% max.
S355J2N	1.0577	0,20	0,55	1,60	0,025	0,13	0,55	-

A hegeszthetőség szempontjából kiemelt fontosságú a karbonegyenérték (CEV), melynek segítségével megállapítható a karbon és egyéb kémiai elemek együttes hatása az acél hidegrepedési hajlamára. A jó hegeszthetőséghez fontos, hogy kis karbonegyenértékkel rendelkezzen az adott acéltípus, hiszen a hegesztés során bevitt hő az alap-és hozaganyag megolvasztása mellett jelentősen felhevíti a varrat környezetét is. Az karbonegyenérték kiszámításához szükséges összefüggés a következő [10] (1):

$$CEV = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

A Graville diagram segítségével a szerkezeti acélok három csoportba sorolhatók hegeszthetőségük alapján. Az I. zónában a könnyen hegeszthető, a II. zónában a körültekintően hegeszthető, a III. zónában pedig magasabb karbontartalmuk miatt a nehezen hegeszthető szerkezeti acélok találhatók. (1. ábra)

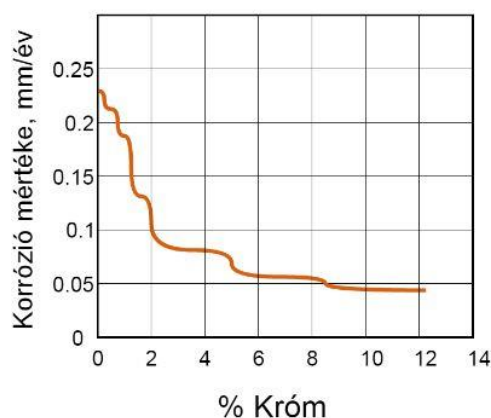


1. ábra: Graville diagram [18]

Alacsony karbontartalma és az ötvözők kis részaránya miatt az S355J2N a körültekintően hegeszthető kategóriába tartozik, tehát szabályozott vonalenergiával elkerülhető a szerkezet repedésérzékenysége.

2.3. Korrózióálló acélok

Korrózióálló acélok széles választéka áll rendelkezésre az iparban, így alkalmazási lehetőségük számos területen adott. Ha az acél krómtartalma legalább 12% (I. rezisztenciahatár) és egy adott közegben a korrózió mértéke nem haladja meg a 0,1 mm/évet, az acél korrózióállónak tekinthető. A króm-ötvöztetés felső határa kb. 29%, mivel e fölött az acél alakíthatósága már nem megfelelő. [11] A 2. ábra a krómtartalom hatását mutatja be a korrózióval szembeni ellenálláshoz viszonyítva.



2. ábra: A Cr tartalom korrózióállóságra tett hatása [5]

Ezen acéltípusok korrózióállósága a felületükön kialakult vékony, pórusmentes oxidrétegnek köszönhető. Általában kevés széntet és több ötvöztöt tartalmaznak. A szénttartalom minimalizálása különösen fontos a korrózióállóság javítása szempontjából. [7]

Kristályszerkezet alapján négy típust különböztethetünk meg a korrózióálló acélok között: ferrites, ferrites+ausztenites (duplex), ausztenites, valamint martenzites acélok. [5] A kutatás szempontjából a továbbiakban az ausztenites korrózióálló acélokkal foglalkozom részletesebben.

Az ausztenites korrózióálló acélok rendkívül jó alakíthatóságuknak, hőállóságuknak és hegeszthetőségüknek köszönhetően a legismertebb és leggyakrabban használt acéltípusok. Legfőbb felhasználási területeik: vegyipar, olaj-és földgáz bányászat, energetika, élelmiszeripar, textilipar, papíripar, környezetvédelem. Körülbelül 16-25% krómtartalommal, továbbá több ötvöztővel rendelkeznek, mint a többi korrózióálló acéltípus, és emiatt drágábbak is, hiszen több értékes ötvöztöt is tartalmaznak (pl. nikkelt). Ennek köszönhetően jelentősen nagyobb ellenállást mutatnak a korrózióval szemben, továbbá szobahőmérsékleten és kis hőmérsékleten is magas szívóssággal jellemezhetők. [2]

2.4. Ausztenites korrózióálló acélok ötvözői

Az ötvözők befolyásolják az acél kritikus átalakulási (A_3 és A_4) hőmérsékleteit, a kritikus hűlési sebességet, továbbá vegyületeket (pl. karbidokat, nitrideket) képeznek. Minden ötvözőnek és szennyezőnek megvan a maga szerepe, amely meghatározza az acél mechanikai, fizikai és kémiai tulajdonságait.

A korrózióálló acélok legfontosabb ferritképző ötvözői: króm (Cr), molibdén (Mo), szilícium (Si), nióbium (Nb), titán (Ti), alumínium (Al), volfrám (W). A ferritképző ötvözők hatására csökken a γ -mező mérete, növekszik az A_3 és csökken az A_4 hőmérséklet. [12]

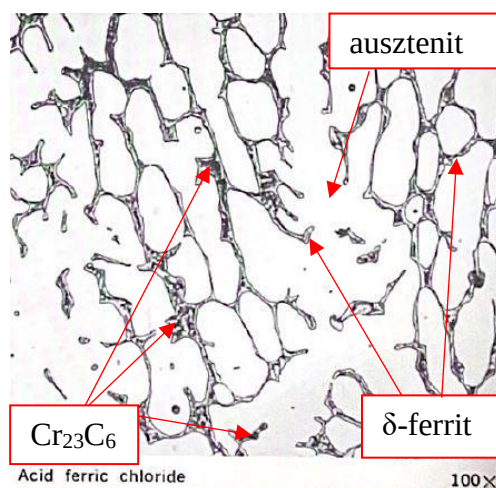
A króm (Cr) a korrózióálló acélok alapötvözője, mivel hatásának köszönhetően nyeri el az acél felülete az oxidációval szembeni passzivitását. Erős ferrit-, karbid-, nitrid-, és oxidképző. A molibdén (Mo) szintén vékony oxidréteget képez az acélfelületen, amely hozzájárul a korrózióállósághoz. Jó ferrit és karbidképző, magas hőmérsékleten növeli a szilárdságot és a kúszásállóságot. Az alumínium (Al) oxigénhez való affinitása segíti a dezoxidációs folyamatokat, erős ferrit- és nitridképző. A szilícium (Si) erős dezoxidáló ötvözőként elősegíti a korróziós ellenállást, jelentősen javítja a hő- és reveállóságot, viszont rontja a melegalakíthatóságot. Hegesztési hozaganyagok gyakori alkotóeleme. A volfrám (W) szűkíti a γ -mezőt, növeli a szilárdságot, edzhetőséget és javítja a reveállóságot. [2, 3]

A korrózióálló acélok legfontosabb ausztenitképző ötvözői: nikkel (Ni), karbon (C), mangán (Mn), réz (Cu). Az ausztenitképző ötvözők növelik a γ -mezőt, lefelé tolják az A_3 hőmérsékletet és emelik az A_4 hőmérsékletet. [12]

A nikkel (Ni) ötvözőként kiemelt jelentőséggel bír a korrózióálló acélgyártásban, javítja a mágneses tulajdonságokat és a szívósságot, valamint növeli a folyáshatárt és csökkenti a hőtágulási tényezőt. Ugyanakkor meglehetősen drága ötvözőnek számít, ezért az utóbbi években az ipar megpróbálta olcsóbb ötvözőkkel helyettesíteni a nikkelt. [13] A mangán (Mn) csökkenti a melegrepedési veszélyt, a vetemedési hajlamot és növeli az acél szilárdságát, kiváló ausztenitképző képességgel bír. A réz (Cu) kis mértékben segíti az ausztenitképződést, és javítja a feszültségkorrózióval és egyes savakkal szembeni ellenállást. [2, 3]

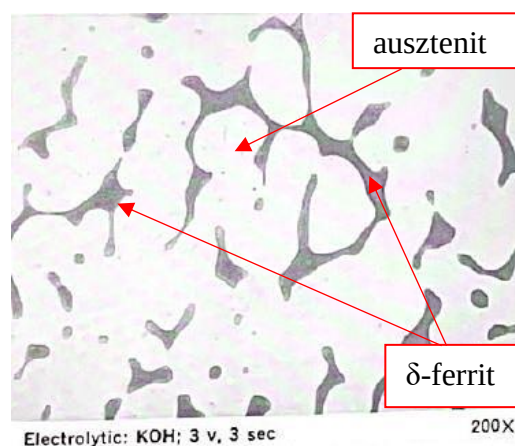
A korrózióállóságot jelentősen rontó karbon (C) minél kisebb részaránya az alapvető cél az korrózióálló acélgyártásban, viszont javítja a szilárdsági értékeket és erős ausztenitképző hatással bír, ezért más erős ausztenitképzővel kell pótolni a kívánt szövetszerkezet biztosítása

érdekében. Mivel a króm és a karbon egymás iránti affinitása nagy, ezért a vasban egyesülve egy oldhatatlan karbidot képeznek, ez pedig a króm-karbid (Cr_{23}C_6). A króm-karbid a szemcsehatárokon képződik és válik ki, ezáltal a szemcsehatár környezete krómban jelentősen elszegényedik. Ezen a részen az acél krómtartalma az I. rezisztencia határ (12%) alá csökkenhet, ami a szemcsehatár menti korrózió melegágya lehet. Ezt szemlélteti a 3. ábra. [2, 3]



3. ábra: Krómkarbid kiválások egy ausztenites acél szövetszerkezetében [14]

A krómkarbid kiválás magas hőmérsékleten (600-700 °C) és hosszabb idő alatt megy végbe. Hegesztés során elkerülhetetlen a magas hőbevitel, ezért a kiválások elkerülése céljából hőkezelést alkalmaznak. Olyan magas hőmérsékletre hevítik fel az acélt, ahol a kivált karbidok újra feloldódnak. (4. ábra) [7, 3]

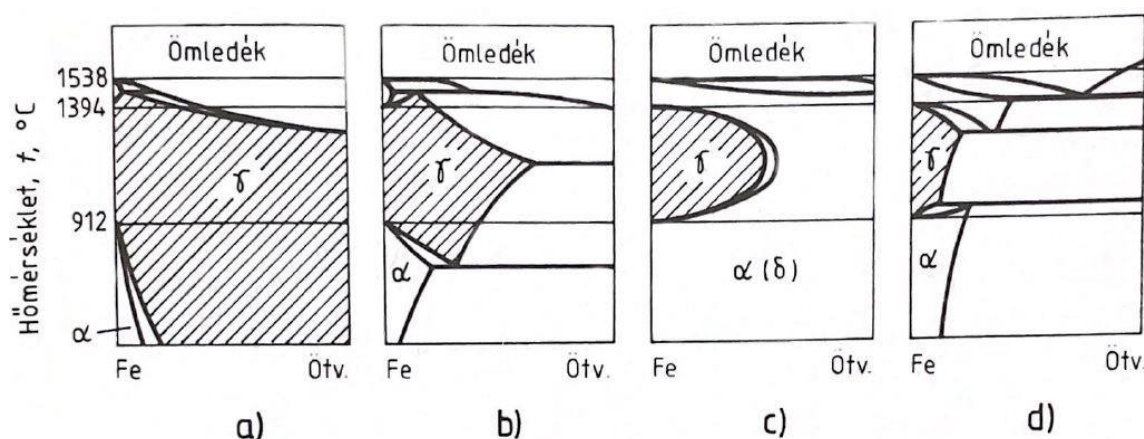


4. ábra: 1077 C°-on hőkezelt és vízzel hűtött ausztenites acél szövetszerkezete [14]

A 3. ábrán látható krómkarbidok feloldódtak, és ferritszigetek maradtak az ausztenit mátrixban. Ez a hőkezelés azonban elég költséges eljárás, ezért legtöbbször a karbidképződés elkerülése céljából minél kisebb (<0,03%) karbontartalmú acélokkal dolgozik az ipar. Minél

kisebb az acél széntartalma, annál nagyobb a kiválás időszükséglete. Egy másik megoldási lehetőség a stabilizáló ötvözők használata, amelyek nagyobb affinitást mutatnak a karbonnal, mint a króm. Ide sorolható a titán (Ti), a nióbium (Nb), a tantál (Ta) és a molibdén (Mo). Karbidlekötő hatása miatt a titán és nióbium ideálisan stabilizálja a korrózióállóságot, krómkarbidok helyett titán-karbid (TiC) és nióbium-karbid (NbC) keletkezik. Ideális ferrit- és nitridképzők, a nióbium továbbá szilárdságnövelő hatással is rendelkezik. [7, 3]

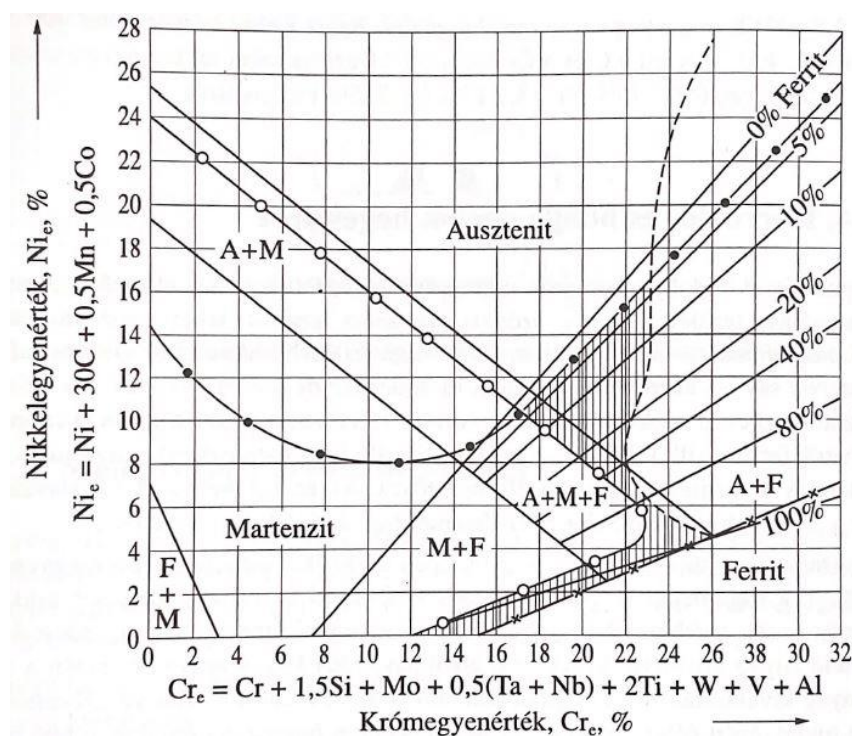
Az ötvözőelemek γ -mezőre gyakorolt hatását az 5. ábra mutatja be. Az 5. ábra képei alapján a tisztán ausztenites szövetszerkezet eléréséhez nélkülözhetetlen ötvöző a kobalt, a mangán és a nikkel, továbbá bizonyos mennyiségű széntartalom és megfelelő hűlési viszony. [2]



5. ábra: Az ötvözőelemek hatása a γ -mezőre [2]
 a, nyitott γ -mező, ausztenitképző (Ni, Mn, Co);
 b, és d, zárt γ -mező;
 c, zárt γ -mező, ferritképző (Cr, Al, Si, Ti, Mo, V, W)

2.4. Ausztenites korrózióálló acélok felrakóhegesztése

A felrakó hegesztéseknél gyakori probléma, hogy az erősen ötvözött varrat első sora az alapanyaggal keveredve rideg, martenzites szövetszerkezetet eredményez. A két merőben eltérő összetételű anyag közti kapcsolat csak ún. párnaréteg készítésével hozható létre. A varrat szövetszerkezete alapján jól megbecsülhetők a mechanikai tulajdonságok, a hegesztési sajátosságok és a korrózióval szembeni ellenállás. E célból előszeretettel használják a Schaeffler-diagramot, amely az erősen ötvözött acélok fázisviszonyait mutatja be. (6. ábra)



6. ábra: Schaeffler-diagram [15]

- x – szemcsedurvulási veszély $T > 1150\text{ °C}$;
- σ -fázis kiválási veszély $500\text{--}900\text{ °C}$ között;
- melegrepedési veszély $T > 1250\text{ °C}$;
- °° hidegrepedési veszély 400 °C körül

A diagram vízszintes tengelyén a ferritképző ötvözőket tartalmazó krómegyenérték, a függőleges tengelyen pedig az ausztenitképző ötvözőkből képzett nikkelegyenérték található. Az egyes ötvözők szorzófaktorai a hatáserősséget mutatják a szövetszerkezet szempontjából. A diagram segítségével jó közelítéssel megállapítható az anyag várható összetétele, amely alapvető fontossággal bír a hegesztőanyag kiválasztásánál. A diagram sraffozott területe a veszélymentes zónát jelzi, így érdemes úgy megválasztani a technológiát, hogy a kialakult varrat ebbe a tartományba essen. [3, 2, 15]

A ferrites krómacélok $T > 1150\text{ °C}$ -on hajlamosak a szemcsedurvulásra, ezért ügyelni kell a kis hőbevitellel történő hegesztésre. Ezt jelzi a 6. ábrán az x-szel jelölt sáv. [3, 2, 15]

Az erősen ötvözött korrózióálló acélokban jelentős a kiválási hajlam az ötvözők nagy mennyisége és jellege miatt. Ezek a kiválási folyamatok hőmérséklet-és időfüggők. A szaggatott vonal a σ -fázis okozta elridegkedést jelöli $500\text{--}900\text{ °C}$ közötti hőmérsékleten. A σ -fázis vas-króm vegyület, amely a krómmal erősen ötvözött acélokból válik ki, ezáltal rontja a mechanikai tulajdonságokat és a korrózióállóságot. Ez leginkább a 10%-nál több ferritet tartalmazó ausztenites-ferrites acélokat veszélyezteti, hiszen a ferritképző ötvözők jelenléte segíti elő a σ -fázis kialakulását. Az ausztenitképzők mennyiségének csökkenése is kedvez a szigma fázis kialakulásának. Fontos, hogy a szigma fázis kiválása mindig a ferritben indul meg, mikroszkópos felvételeken igen változatos a megjelenése. Finomabb szemcsés acélokból túszerű kiválások láthatók, gyakran kisebb-nagyobb csomókban jelenik meg a szemcsehatárokon, vagy a szemcsék belsejében, máskor gyöngyfüzér jelleget ölt a szemcsehatárok mentén. [3, 2, 15]

A melegrepedékenység a teljesen ausztenites hegyanyagra jellemző 1250 °C felett, de megfigyelhető az ausztenites-martenzites, az ausztenites-ferrites és a martenzites acélok esetén is. Ha jelen van kisebb mennyiségű δ -ferrit, akkor csökken a melegrepedés veszélye, mivel a ferrit jobban oldja a melegrepedést előidéző elemeket (Si, S, P), mint az ausztenit. [3, 2, 15]

A hidegrepedékenység területébe tartoznak a martenzites, martenzites-ausztenites, illetve a martenzites-ferrites szövetszerkezetű acélok. [3, 2, 15]

Az egyes szövetelemek különböző tulajdonságokkal rendelkeznek a folyáshatárt, átmeneti hőmérsékletet, alakváltozó képességet és korróziós ellenállást illetően. (2. táblázat) [16]

2. táblázat: A szövetelemek korrózióálló acélok szempontjából fontos tulajdonságai [16]

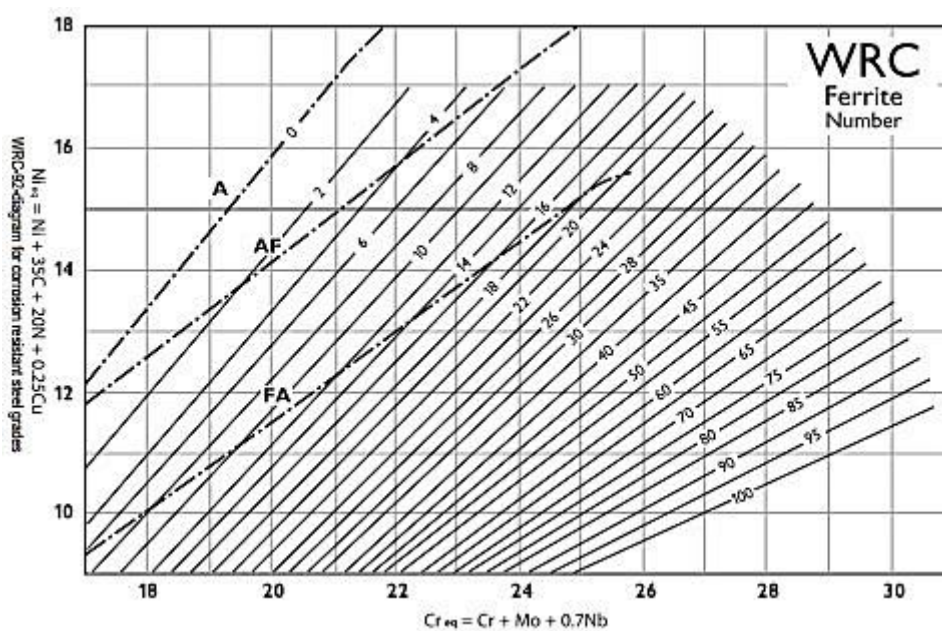
	Folyáshatár	Átmeneti hőmérséklet	Alakváltozó képesség	Korróziós ellenállás
Martenzit	nagy	nagy	kicsi	kicsi
Ausztenit	kicsi	kicsi	nagy	nagy
Ausztenit + Ferrit	közepes	közepes	közepes	közepes
Ferrit	közepes	nagy	közepes	kicsi

2.5. Ferrittartalom meghatározása

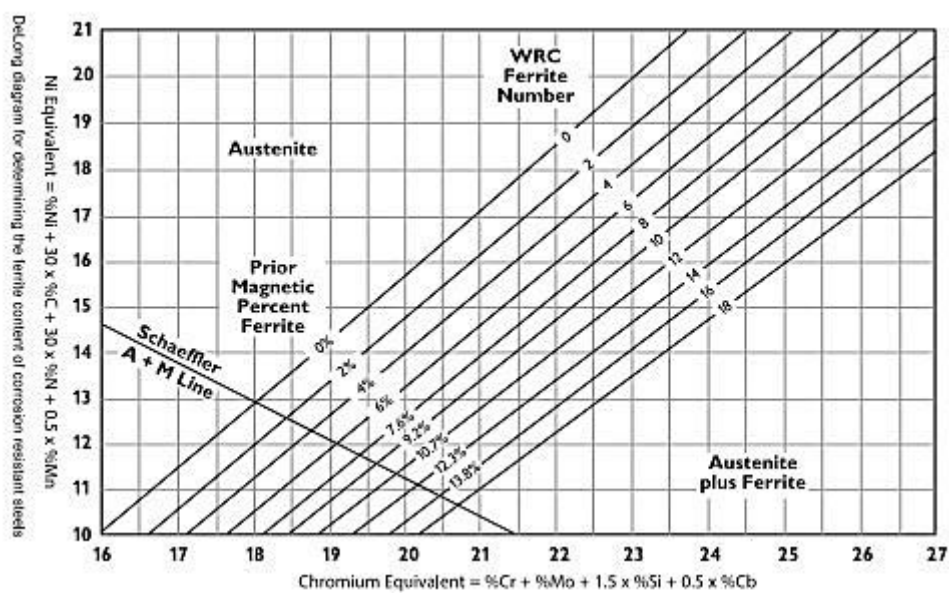
Az ausztenites korrózióálló acélok gyártása során homogén ausztenites szövetszerkezet elérésére törekednek a kiválások, felületre kifutó rácshibák, felületi egyenetlenségek és repedések, korróziós káresetek elkerülése miatt. Ugyanakkor számos esetben más szövetelemek és kiválások teszik bizonyos fokig heterogénné a szövetet. A gyakorlatban a korrózióálló acéltípusok nem teljesen ausztenitesek, hanem kisebb mennyiségben tartalmaznak δ -ferritet is, amely kifejezetten előnyös is, mivel csökkenti a repedésérzékenységet, azonban azt is szem előtt kell tartani, hogy a ferrit 10% feletti jelentléte csökkenti a korrózióállóságot. A ferrit 800-850 °C között átalakul σ -fázissá, amelynek kifejezetten nagy a korrózióérzékenysége. [3]

A ferrittartalom, azaz a ferritszám (Ferrite Number, FN) a hegesztési varrat kémiai összetételéből meghatározható. Különböző mikroszerkezeti diagramok használhatók erre a célra. Ezek közé tartozik a már korábban is említett Schaeffler diagram, továbbá a WRC-92 diagram, és a DeLong diagram. Ugyanakkor fontos megjegyeznünk, hogy az egyes diagramokból kapott eredmények eltérhetnek egymástól. A 7. ábrán látható WRC-92 diagram előrejelzést ad a ferrittartalomról FN-ben kifejezve. Ez a legfrissebb a felsorolt diagramok közül, és sok esetben jobb egyezést mutat a mért és a becsült ferrit között, mint a 8. ábrán bemutatott DeLong diagram, amely akkor vált használatossá, amikor a nitrogén (N), mint ausztenitképző elem is fontos ötvözővé vált. Megjegyzendő, hogy a WRC-92 diagram nem veszi figyelembe a szilícium (Si) és mangán (Mn) tartalmat, ami azt jelenti, hogy alkalmazhatósági tartománya a magas (> 8%) szilícium- és mangántartalom esetén korlátozott. Ráadásul, ha a nitrogéntartalom több mint 0,2%, akkor ismét korlátozottan alkalmazható. [2, 7]

A Schaeffler-diagramhoz hasonlóan ennél a két diagramnál is a króm- és nikkel-egyenérték kiszámítása segíti a ferritszám meghatározását. A DeLong és a WRC diagram ugyanakkor más-más empirikus összefüggéssel dolgozik. A kiszámított egyenértékek alapján meghúzott segédvonalak metszéspontja adja a varratfém szövetszerkezetének és ferritszámának becslését.



7. ábra: WRC-92 diagram [7]



8. ábra: DeLong diagram [7]

3. Kísérleti munka

3.1. Hegesztő berendezés

A hegesztő alrendszer egy IGM KUKA RTE-4 típusú hegesztőrobot kar alkotja, mely 6+2 rotációs tengellyel és TPS 4000-es áramforrással rendelkezik. Alkalmas 131-, 135-, 136-, 137-es hegesztési eljárásokhoz, valamint online is programozható. A technikai háttér a 9. ábra mutatja be.



9. ábra: IGM KUKA RTE-4 hegesztőrobot a perifériákkal és a befogóegységekkel

3.2. A technológia jellemzői

A kísérletek során, a célkitűzésemmel összhangban, kiemelten vizsgáltam az S355J2N minőségű szerkezeti acélon történő korrózióálló ausztenites rétegfelrakás technológiai lehetőségeit. A roboton történő hegesztést porbeles huzallal végeztük, amely korszerű hozaganyagnak számít. A porbeles huzalelektroda használatát a tömör huzallal ellentétben számos előnye is indokolta: nagy termelékenység, széles vegyi összetételhez alkalmazható, az éleltolódásra kevésbé érzékeny, a hegfürdő átlagos hőmérséklete kisebb, kevésbé fröcsköl, stabil hegesztőívet ad, és alacsony szinten tartja a szennyezőtartalmat. Hátránya a magasabb beszerzési költség, valamint felkészült szakembert igényel. Fontos a porbeles huzalok alkalmazásának szabályait is betartani (tisztaság, védőgáz összetétel). A ferritszámot jelentősen csökkenti, ha a környezetből (munkadarab felületéről, a védőgázból, a hegesztő kesztyűjéről, stb) szén, és nitrogén kerül a varratba.

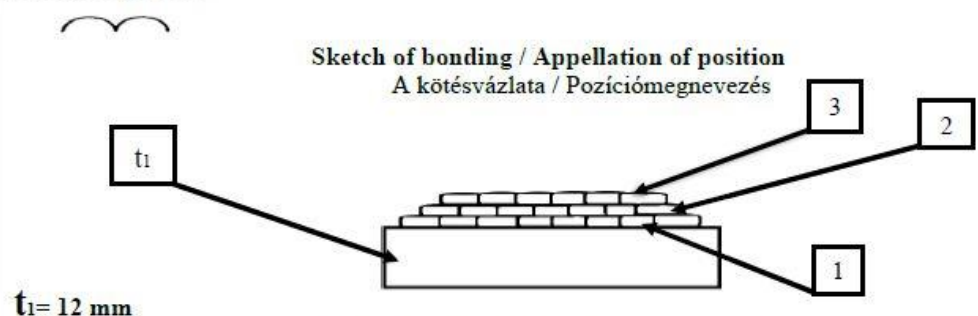
Az első réteg alapvetően a párnaréteg heganyaga. Az eljárás során figyelni kellett arra, hogy a kötés ne hevüljön a megengedettnél nagyobb hőmérsékletre, különben a varrat inhomogénné válik és repedés keletkezik. A homogén szövetszerkezet elérése egy korrózióálló acélnál alapvető törekvés, hiszen minden inhomogenitás korróziós támadás kiindulópontjává válhat. Kísérletünkben az első varratsor egyfajta közbenső réteggént szolgált, mivel a második és harmadik réteg nagyban eltér a gyengén ötvözött szerkezeti acél összetételétől, és tisztán ausztenites szövet elérése volt a cél.

A kísérletek során a választott hegesztőanyagok alkalmazása minden esetben a huzalhoz ajánlott védőgázzal történt, ezeket a paramétereket a WPS (Welding Procedure Specification – Hegesztési utasítás) tartalmazza. (3. és 4. táblázat)

3. táblázat: A hegesztési utasítás (WPS) 1. részlete

GINOP-2-2-1-18	Welding procedure specification (WPS) by EN ISO 15609-1 Hegesztési utasítás (WPS) az EN ISO 15609-1 szerint	WPS-FH3
Manufacturer/Gyártó: Széchenyi István Egyetem hegesztőlaboratórium		
Method of welding/ Hegesztés módja: automated / automatizált (robot)		
Type: IGM K5	Power source/Áramforrás: Fronius TPS 4000	
WPQR-Number: - WPQR száma:	Material Thickness s_1 [mm]: 12 mm Anyagvastagság:	
Base Metal 1: S355J2+N Alapanyag 1:	Material Thickness s_2 [mm]: Anyagvastagság:	
Base Metal 2 Alapanyag 2:	Type of preparation: Termikusvágás, Az élelőkészítés fajtája: Forgácsolás	
Welding process: 135-P (EN ISO 4063) Hegesztési eljárás:	Type of edge cleaning: Kőszőrülés Az éltisztítás fajtája:	
Welding position: PA (EN ISO 6947) Hegesztésipozíció:	Number of wire electrode: 1. réteg: FOXcore 309LMo-T0 Battch No: 2309302 2. réteg: FOXcore 316L-T0 Battch No 2309455 3. réteg: FOXcore 316L-T0 Battch No 2309455	
Type of welded seam: BW Varrattípus:	Welding qualification: - Hegesztőminősítés:	
Shielding gas /Védőgáz : M12 (97,5% Ar+2,5% CO ₂) EN ISO 14175	Filler metal / Hozaganyag: 1.réteg: FOXcore 309LMo-T0 MSZ EN ISO 17633-A: T 23 12 2 L R M21/C1 3 2.réteg: FOXcore 316L-T0 MSZ EN ISO 17633-A: T 19 12 3 L R M21/C1 3 3.réteg: FOXcore 316L-T0 MSZ EN ISO 17633-A: T 19 12 3 L R M21/C1 3	

4. táblázat: A hegesztési utasítás (WPS) 2. részlete

Felrakó hegesztés  Sketch of bonding / Appellation of position A kötésvázlata / Pozíciómegnevezés $t_1 = 12 \text{ mm}$									
Welding parameters /Hegesztési paraméterek									
Run réteg/ varratsor	Welding process Hegesztési eljárás	Wire diameter Huzalátmérő [mm]	Teljesítmény [%]	Current Áramerősség [A]	Voltage Feszültség [V]	Electricity type/ Polarity Áramfajta/ Polaritás	Travel speed Hegesztési sebesség [cm/min]	Amount of gas flow Gázátfolyásmennyisége [l/min]	Heat input Hőbevitel [kJ/mm]
1/12	135-P	1,2	52%	222-225	24,8-24,9	DC/+	30	12-14	0,88-0,95
2/11	135-P	1,2	52%	222-225	24,8-24,9	DC/+	30	12-14	0,88-0,95
3/10	135-P	1,2	52%	222-225	24,8-24,9	DC+	30	12-14	0,88-0,95
Page/Lap: 1/1			Made out: /Kiállítva: Győr, 2022.05.03.						
Varga László Hegesztőszakmérnök EWE/TWE			Manufacturer/Gyártó:				Certificatory/Tanúsító:		

Az alkalmazott hegesztőanyagok főbb jellemzőit az alábbi táblázatok tartalmazzák (5. és 6. táblázat).

5. táblázat: E309LMo T0 hozaganyag vegyi összetétele és mechanikai tulajdonságai [17]

Classifications					high-alloyed rutile	
EN ISO 17633-A:			AWS A5.22:			
T 23 12 2 L R M21 3 ; T 23 12 2 L R C1 3			E309LMoT0-4 ; E309LMoT0-1			
Typical composition of all-weld metal (Wt-%)						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	
0.025	0.7	1.4	22.9	12.6	2.7	
Ferrite 25 FN; WRC-92						
Mechanical properties of all-weld metal						
Heat Treatment	Yield strength 0.2%	Tensile strength	Elongation ($L_o=5d_o$)	Impact values in J CVN		
	MPa	MPa	%	+20°C:		
untreated	500	700	30	55		

6. táblázat: E316L T0 hozaganyag vegyi összetétele és mechanikai tulajdonságai [17]

Classifications				high-alloyed rutile		
EN ISO 17633-A:		AWS A5.22:				
T 19 12 3 L R M21 3 ; T 19 12 3 L R C1 3		E316LT0-4 ; E316LT0-1				
Typical analysis of all-weld metal (Wt-%)						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	
0.025	0.7	1.5	19.0	12.0	2.7	
Ferrite 10 FN; WRC-92						
Mechanical properties of all-weld metal						
Heat Treatment	Yield strength 0.2%	Tensile strength	Elongation ($L_0=5d_0$)	Impact values in J CVN		
	MPa	MPa	%	+20°C:	−40°C:	−196.°C
untreated	400	560	33	55	50	28

Ahogy a táblázatokban látható, az 1. réteg több króm és nikkel ötvözt tartalmaz, mint a 2. és 3. réteg. Erre azért van szükség, hogy az alaplemez felől a korrózió ne tudjon megindulni a határmezőn keresztül, hiszen az S355J2N krómban erőteljesen szegény acél, és a határmezsgyéken is biztosítanunk kell a korrózióállóságot. Továbbá, ahogy a korábbi fejezetekben is szerepel, a magasabb ötvöző tartalom meglehetősen drágává teszi az adott hozaganyagot, így költséghatékonyság szempontból választottunk egy olcsóbb elektródát a 2. és 3. réteg elkészítéséhez.

Általánosságban elmondható, hogy ezek a kémiai ellenálló hozaganyagok a „hegesztésre nagyon alkalmas” kategóriába sorolhatók. Rendkívül alacsony széntartalmuknak köszönhetően nem edzhetők, ami azt jelenti, hogy a hőhatásövezetben (HAZ – Heat Affected Zone) nem következik be felkeményedés, és nincs jelentős szemcsedurvulás sem. Ahogy a korábbi fejezetekben utaltam rá, bizonyos nehézségekbe ütközhetünk a nem megfelelő technológia megválasztása során. Ezek a következők:

- Szenzibilizáció, azaz a krómkarbid (Cr_{23}C_6) képződése miatti korrózióállóság csökkenés.
- Melegrepedés, azaz a szemcsehatárok menti folyékony réteg kialakulása a hőhatásövezetben.
- Másodlagos kiválások, például a szigma fázis kiválása.

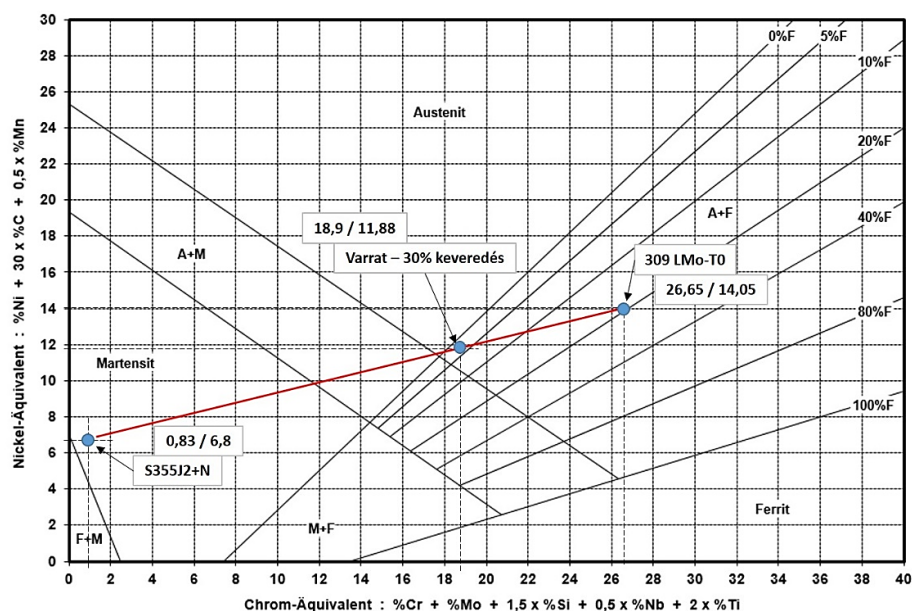
Ezen problémák a megfelelő hegesztőanyagok és az optimális technológia kiválasztásával elkerülhetők. A hegesztési varrat delta-ferrit tartalmának 3-15 FN (ferritszám) tartományban kell lennie. Ez megfelelő ellenállást biztosít a melegrepedésekkel szemben, ugyanakkor nem rontja a korrózióállóságot.

A vizsgált esetben az S355J2N szerkezeti acéllal való keveredést az első réteg felhegesztésekor 35% alatt kell tartani. Ha a hegesztési eljárás eredményeként ennél az értéknél magasabb a keveredés, akkor a varrat ferrittartalmát kalibrált ferrittartalom-mérővel kell meghatározni, vagy a kémiai összetételből becslést kell készíteni pl. a WRC-92 diagram segítségével. A ferrittartalom nem lehet a minimális 3 FN érték alatt.

A felsorolt problémák közül a szemcsehatár korrózió az a lehetséges hibaforrás, amely a mi esetünkben külön megfontolást igényelt. Az első varrat heganyagának megválasztásakor arra törekedtünk, hogy a kívánt keveredés mellett (30 %) olyan szövet keletkezzen, amelyikben a karbidkiválások nem, vagy csak kis mennyiségben jönnek létre. Ennek az a feltétele, hogy a szemcsehatárokon a karbon ne tudja a krómot karbid formájában elvonni, ezáltal az alapfém korróziós rezisztencia szintjét az I. szint (12%) alá csökkenteni. Ennek egyik módja a karbon megkötése a már korábban említett titán és nióbium ötvözéssel. Így szénben dúsult δ -ferrit keletkezik az alapszövetben. Ez a ferrit nem tud edződni, mivel nincs ausztenites állapot a lehűléskor. Tehát a megfelelő technológiával (szabályozott hűtési folyamat, korlátozott vonalenergia alkalmazása) a szemcsehatár korrózió kizárható.

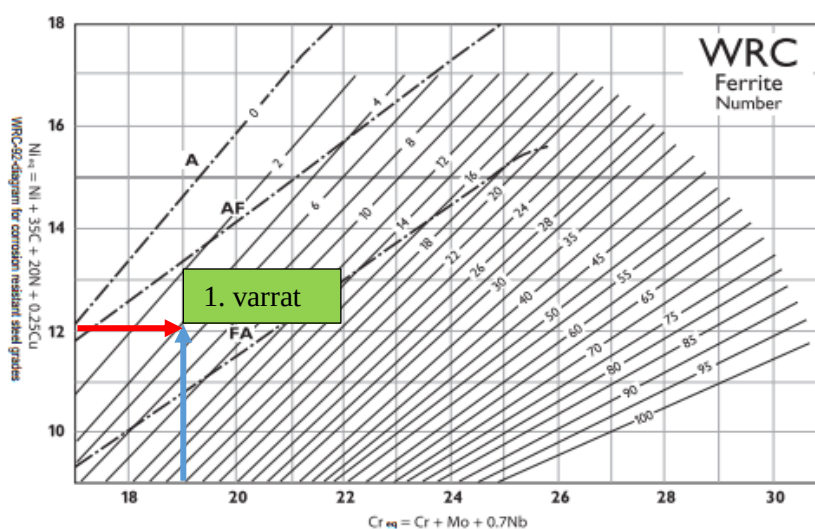
A kísérletek során az első réteg hegesztésekor alkalmazott hegyanyag ferritszáma FN 25, az alapanyaggal (S355J2N) közel 30 %-kal keveredve az alábbi varratszövetet eredményezi:

Schaeffler Diagramm



10. ábra: Az alapanyag és az 1. réteg közti keveredés Schaeffler-diagramban történő ábrázolása

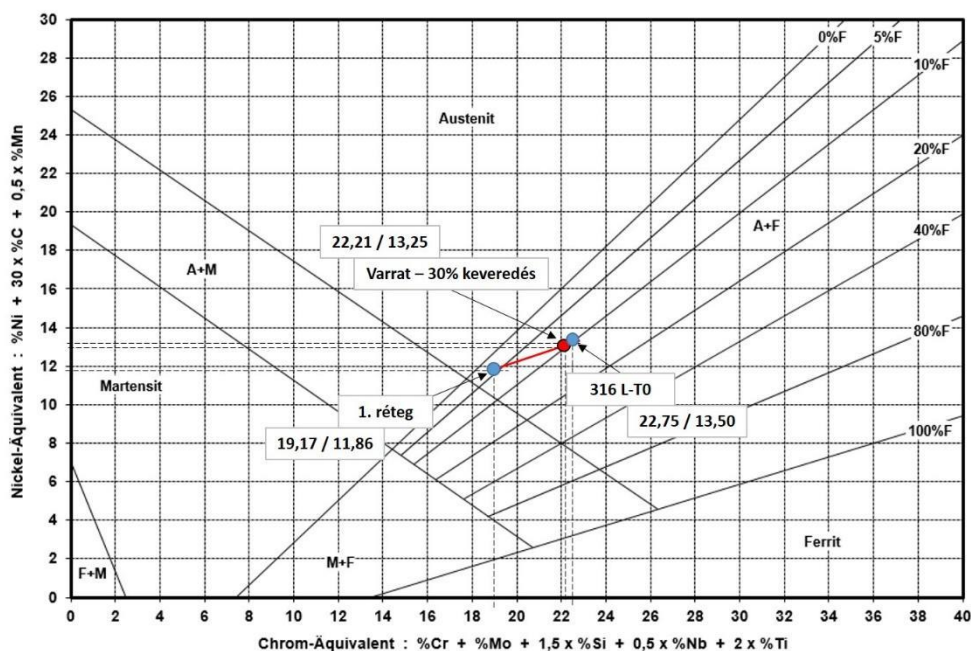
A 10. ábrán az látható, hogy a varratban közel 5 % tiszta delta ferrit keletkezhet, ami a szenzibilizáció elkerüléséhez elegendő és szükséges. A nikkelegyenérték = 12%, a krómegyenérték = 19 %. Ezeket az értékeket a WRC-92 diagramban ábrázolva, szintén közel 5% delta ferritet (FN 5) kapunk (11. ábra).



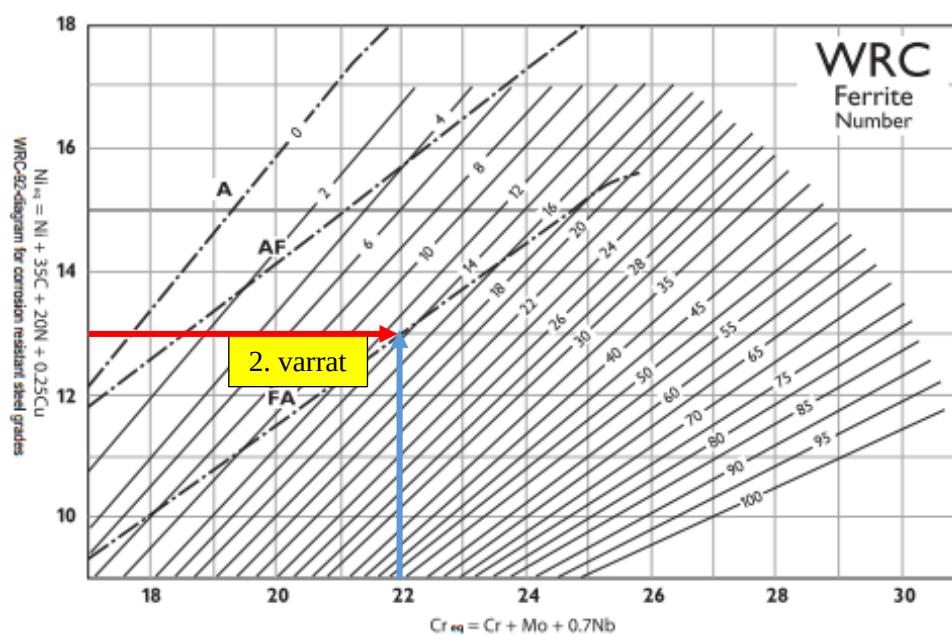
11. ábra: Az alapanyag és az 1. réteg közti keveredés WRC-92 diagramban történő ábrázolása

A 2. réteg hozaganyagának (316 L – T0) ferritszáma 10 FN. A keletkezett heganyag összetételének ferritszáma ezért FN 15 (12. ábra), ami jól egyezik a WRC-92 diagram adatával, mivel a 2. varrat krómegyenérték száma 22%, és nikkel egyenértékszáma 13%. (13. ábra)

Schaeffler Diagramm



12. ábra: Az 1. réteg és a 2. réteg közti keveredés Schaeffler-diagramban történő ábrázolása



13. ábra: A 2. réteg WRC-92 diagramban történő ábrázolása

3.3. Kísérleti próbatest

A 14. ábrán láthatók a felrakó hegesztéssel ellátott próbatest fotói különböző nézetből. A 150x300 mm-es S355J2N szerkezeti acélon 100x200 mm-es tartományban végeztünk felrakó hegesztést.



14. ábra: A próbatestről készült fotók különböző nézőpontból

3.4. Vizsgálatok

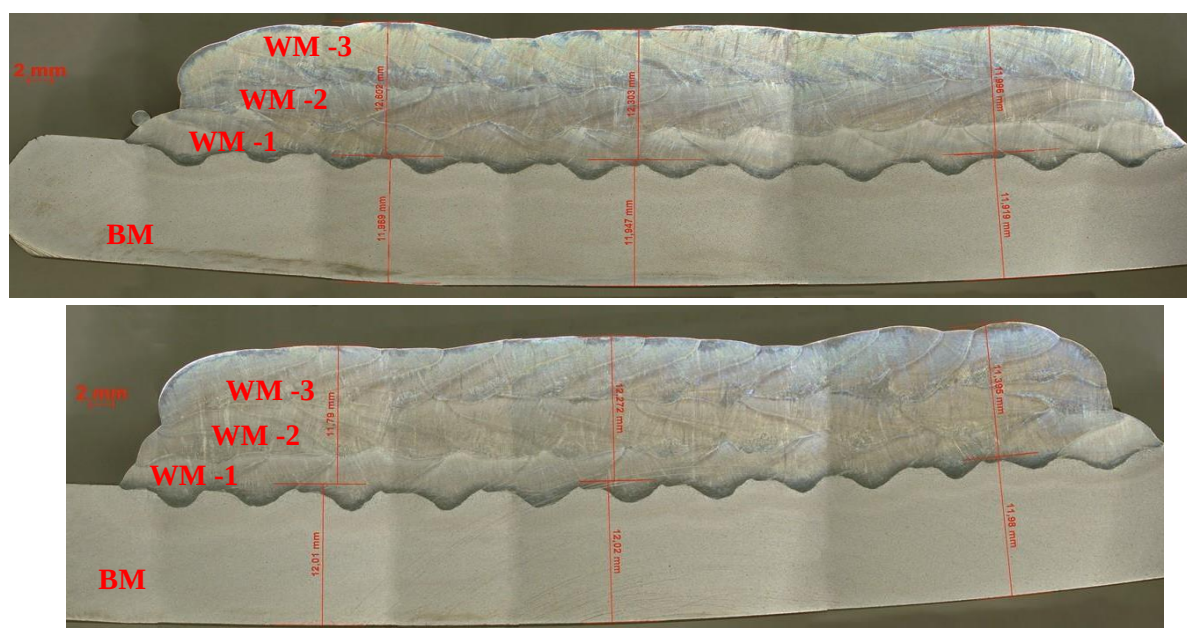
7. táblázat: A felrakó hegesztés vizsgálati terve

Vizsgálati terv			
Alapanyag	Hegesztő-hozaganyag típusa	Varratfajta	Vizsgálatok
S 355J2N (MSZ EN 10025-2) 1.2 anyagcsoport (CR ISO15608)	1. réteg: FOXcore 309LMo-T0 MSZ EN ISO 17633-A: T 23 12 2 L R M21/C1 3 Batch no 2309302 2. réteg: FOXcore 316L-T0 MSZ EN ISO 17633-A: T 19 12 3 L R M21/C1 3 Batch no 2309455 3. réteg: FOXcore 316L-T0 MSZ EN ISO 17633-A: T 19 12 3 L R M21/C1 3 Batch no 2309455	3 rétegű felrakás WPS-FH3	- Makro-és mikroszkópos vizsgálat - Keménységmérés - Sópermet vizsgálat - Mikroszkópos vizsgálat - SEM vizsgálat

Több metszetben vizsgáltuk a próbatestet. A felrakó hegesztések vizsgálatait tartalmazó MSZ EN ISO 15614-7:2020 szabvány előír szemrevételezéses, ultrahangos, vagy folyadékbehatolásos vizsgálatot, oldalhajlító, makroszkópos vizsgálatot, keménységmérést, ferritszám meghatározást és vegyelemzést. Kutatásomban elsősorban, a témából adódóan, mikroszkópai szempontból közelítettem meg az anyagvizsgálatot. A keménységmérésen kívül a mechanikai tulajdonságok vizsgálatára nem térek ki. Első körben makro-és mikroszkópos vizsgálatokat hajtottam végre. Különböző nagyításokban vizsgáltam a keveredési zónák és a rétegek szövetszerkezetét. Keménységméréseket is végeztem, melynek segítségével a repedékenységre, és alakíthatóságra tudunk következtetni. Annak érdekében, hogy párhuzamosan tudjak haladni a vizsgálatokkal, egy metszetet sópermet vizsgálatnak vetettünk alá. Tehát alapvetően kétféle állapotban vizsgálódott: a sópermet vizsgálat előtti és utáni állapotokra voltam kíváncsi, hiszen a próbatest korrózióállóságát csak egy erősen korrodáló környezetben tudjuk próbára tenni. A sópermet teszt után újabb mikroszkópos vizsgálatok következtek, melyek során tanulmányoztam a varratban keletkezett esetleges változásokat. Ezt követően pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam a kémiai összetételt.

3.4.1. Makro-és mikroszkópos vizsgálat a sópermet vizsgálat előtt

A varratra merőlegesen készített csiszolatok makro fotói az alábbi ábrákon láthatók. A mintákat különböző finomságú (80, 180, 400, 600, 1000, 1200, 2500) SiC csiszolópapírokon készítettem elő, ezt követte a polírozás (MD-Dac, MD-Chem), majd pedig a 6 %-os nitallal és ammónium molibdenáttal történő maratás. A vizsgálatot az MSZ EN ISO 17639:2022 szabvány alapján végeztem Zeiss Stereo Discovery V20 stereo mikroszkóppal. A próbatest méretei miatt több makroszkópos felvételből összeállított mozaikkép készült. (15. ábra)



15. ábra: A csiszolatok makroszkópos felvételei

BM – S355J2N alaplemez

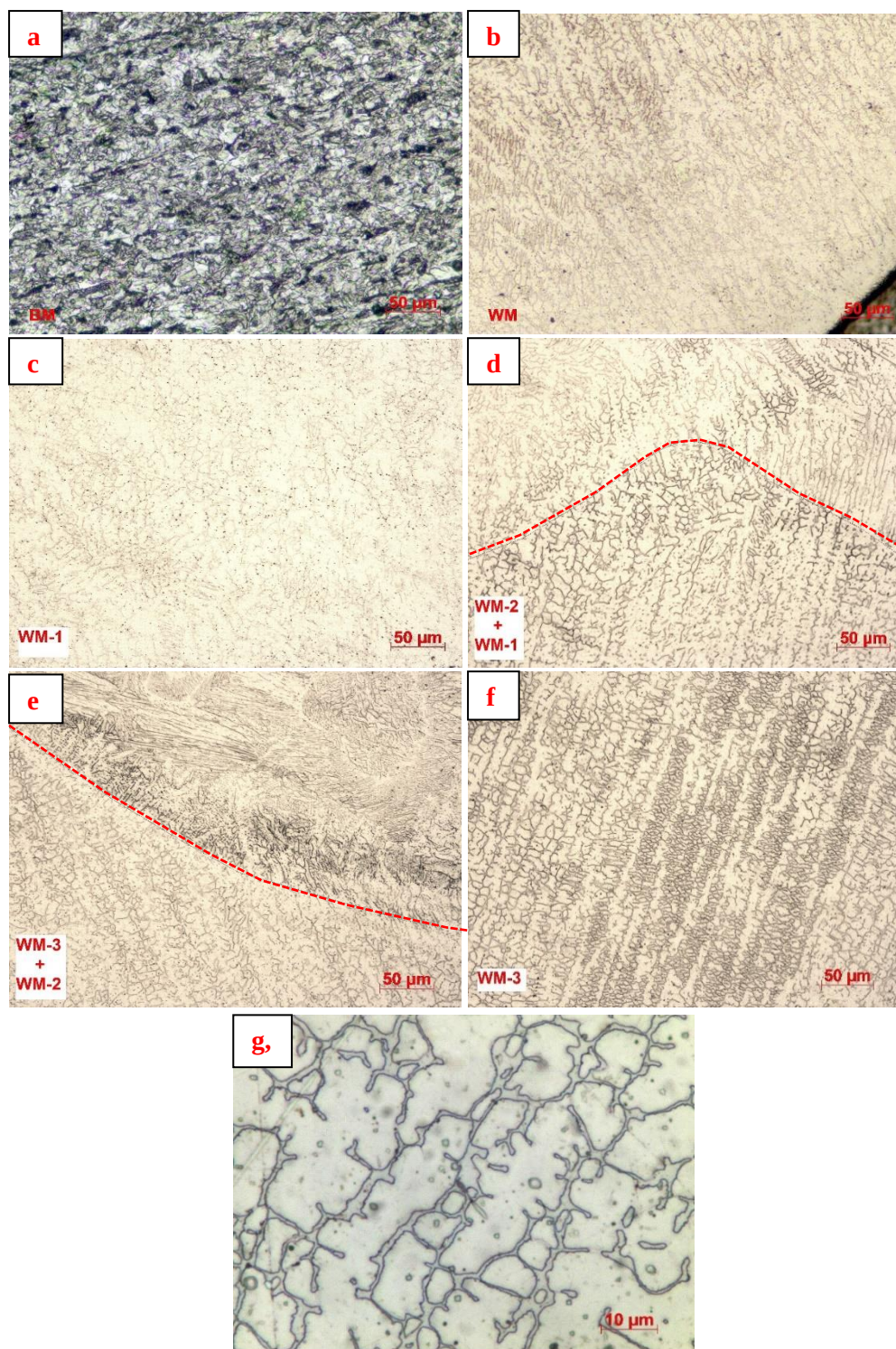
WM-1 – 1. réteg (309LMo-T0)

WM-2 – 2. réteg (316L-T0)

WM-3 – 3. réteg (316L-T0)

A 12 mm vastag S355J2N alaplemezre közel azonos vastagságú korrózióálló réteg került felrakásra. A 3 réteg együttes vastagsága az 1. mintán átlagosan 12,300 mm, a 2. mintán pedig 11,819 mm. A későbbiekben azt a kérdést vizsgáljuk, hogy hány réteg szükséges az optimális korrózióállóság eléréséhez.

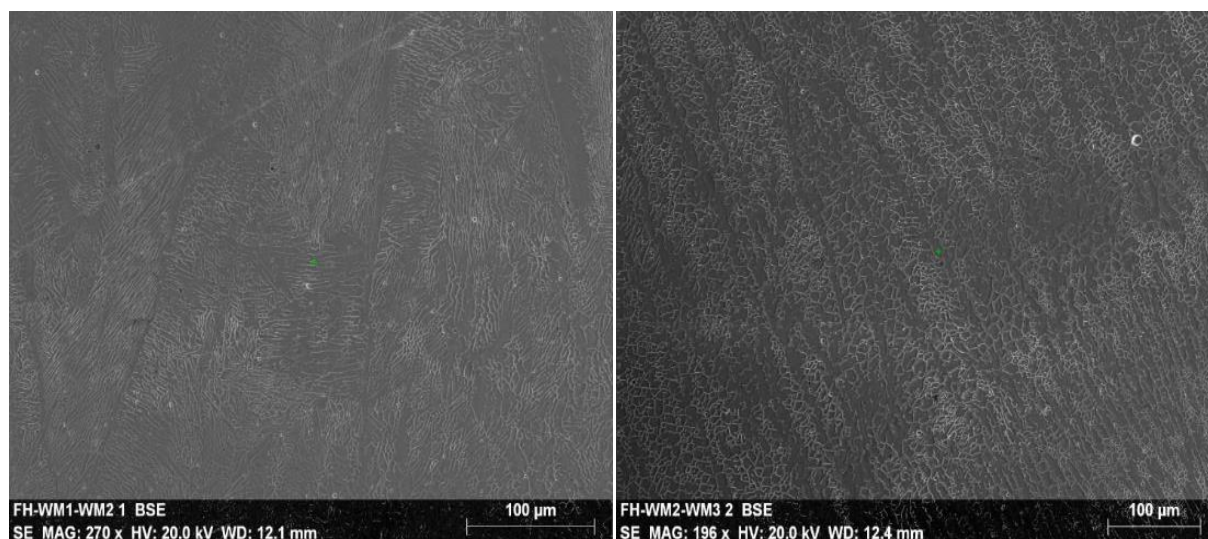
A makroszkópos vizsgálatot a mikroszkópos felvételek készítése váltotta fel, melyet szintén az MSZ EN ISO 17639:2022 szabvány alapján végeztem Nikon TS100 optikai mikroszkóppal, AxioVision SE64 Rel.4.9.1. szoftver segítségével. (16. ábra)



16. ábra: Mikroszkópos felvételek:

- a, BM – S355J2N alaplemez szövetszerkezete: ferrit+perlit
- b, c, WM-1 – 1. réteg szövetszerkezete: kevés delta ferrit + ausztenit
- d, WM-1 és WM-2 – 1. és 2. réteg határa
- e, WM-2 és WM-3 – 2. és 3. réteg határa
- f, WM-3 – 3. réteg szövetszerkezete: delta ferrit + ausztenit
- g, WM3 szövetszerkezete nagyobb felbontásban

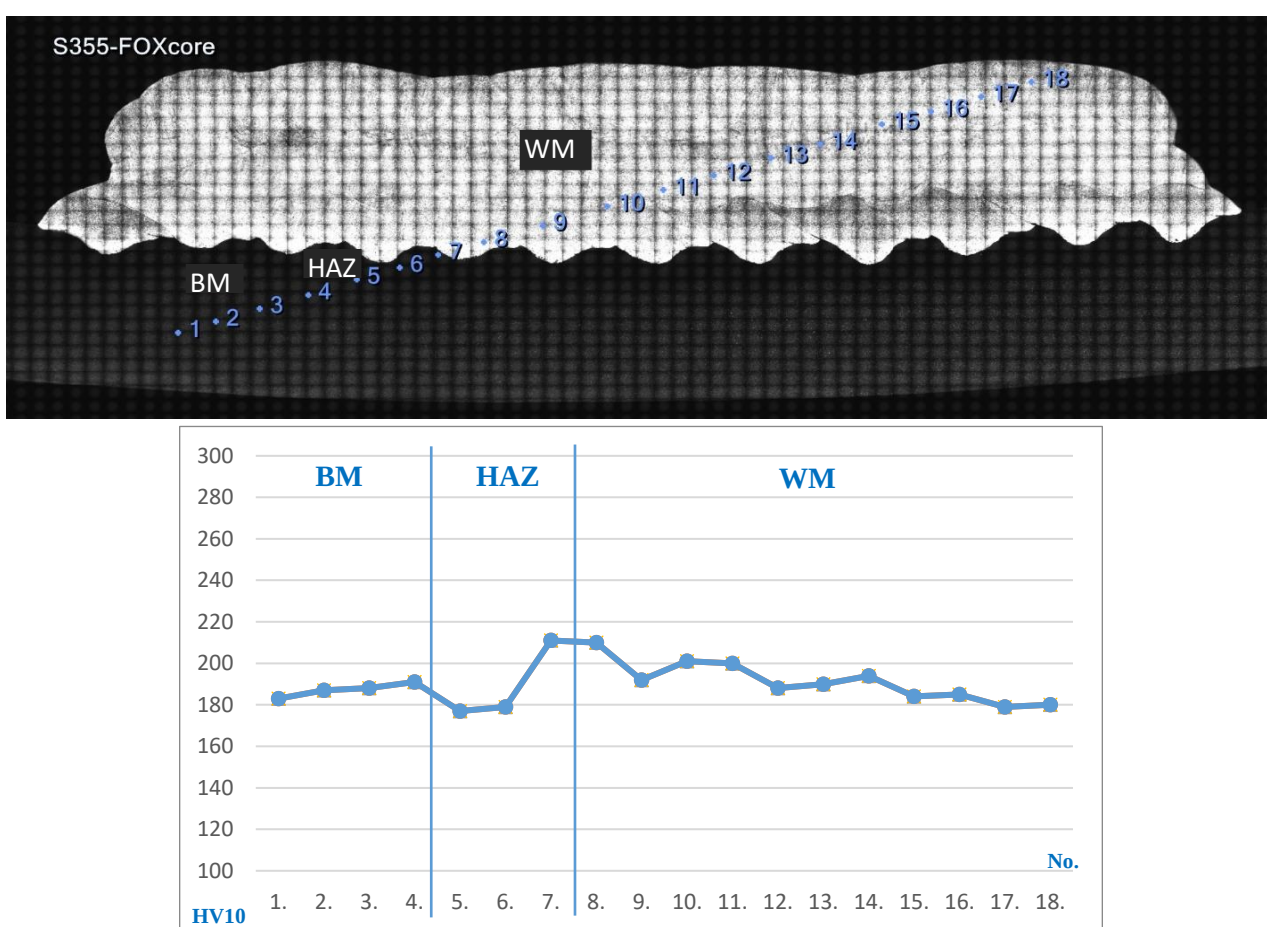
A vizsgálati anyagokból jól látható, hogy a varrat szövetszerkezete ausztenites, hálószerű delta ferrittel. Ez igazolja, hogy valóban heterogén szövetszerkezet alakul ki, ami egyfajta kompromisszum, hiszen ezáltal egyesíthetők korróziós szempontból a ferrites és ausztenites szövet előnyei. A homogenitást elsősorban nem a szövetszerkezet egyneműségéként kell értelmeznünk, hanem a szerkezet kompakt, egységes egészként történő viselkedéseként a korrózióval szemben. Nyilván ez a kompromisszum megköveteli, hogy biztonsággal kézben tartsuk ezeket az inhomogenitásokat a megfelelő technológia megválasztásával. Megfigyelhető némi szigma fázis kiválás is kisebb csomók formájában, valamint elszórtan salakzárványok is láthatók. A dendrites hálószerű ferrit az elektronmikroszkópos felvételeken is jól látszik. (17. ábra).



17. ábra: Elektronmikroszkópos felvételek a keveredési zónákról
1. varratban 5 FN, 2. varratban 15 FN

3.4.2. Keménységmérés

A következő vizsgálat a keménységmérés volt. Az MSZ EN ISO 15614-7:2020 szabvány szerint, a 18. ábrán bejelölt helyeken mértem a keménységet szobahőmérsékleten, Vickers módszerrel MSZ EN ISO 6507-1:2018 szabvány alapján, KB 30 típusú keménységmérő gépen. A terhelés $F = 98,1 \text{ N}$ (10 kp) volt. Hegesztett kötések keménységmérésekor minden esetben mérni kell az alapszövet (BM – Base Metal), a hőhatásövezet (HAZ) és a varrat (WM – Weld Metal) keménységét is. Felrakó hegesztésnél a vonatkozó szabvány szerint 15° -os szögben kell lenyomatsort készíteni. (18. ábra)



18. ábra: Keménységmérési pontok helyei és a keménységmérési diagram

Ahogy a diagramon is látszik, az alacsony széntartalomnak köszönhetően nem történt felkeményedés a hőhatásövezetben, és a varrat keménysége sem tér el az alapszövetétől, így biztonsággal kijelenthetjük, hogy nem ment végbe számottevő kiválás. Továbbá az alapanyagban mért keménységértékek sem haladják meg a szabványban előírt értéket (320 HV_{10}).

3.4.3. Sópermet vizsgálat

Korróziós vizsgálatoknál a korróziós hajlam megítélése a cél a mintát érő hatások mesterséges szimulációjával. A sópermet vizsgálatot egy Ascott CC1000iP berendezéssel végeztük az MSZ EN ISO 9227 NSS szabvány alapján. A vizsgálat időtartama 336 óra, azaz 2 hét, a vizsgálati kamra hőmérséklete pedig 35 C° volt. A vizsgálati térben a korrozív közeget egy 5%-os sóoldat (ioncserélt víz+só) képezte, a vonatkozó szabvány által előírt só minősége pedig Ascott Corrosalt volt. A pH oldat 7,05, a kihullott pH oldat 7,00, az oldat kihullás pedig 1,50 ml/h átlag volt.

Az alábbi képeken látható a hegesztett kötés sópermet vizsgálat előtti és utáni állapota. Az erős korróziós közeg jelentős korróziós sérülést okozott az S355J2N alaplemezen, de a korrózióálló réteg szabad szemmel sértetlennek tűnik.



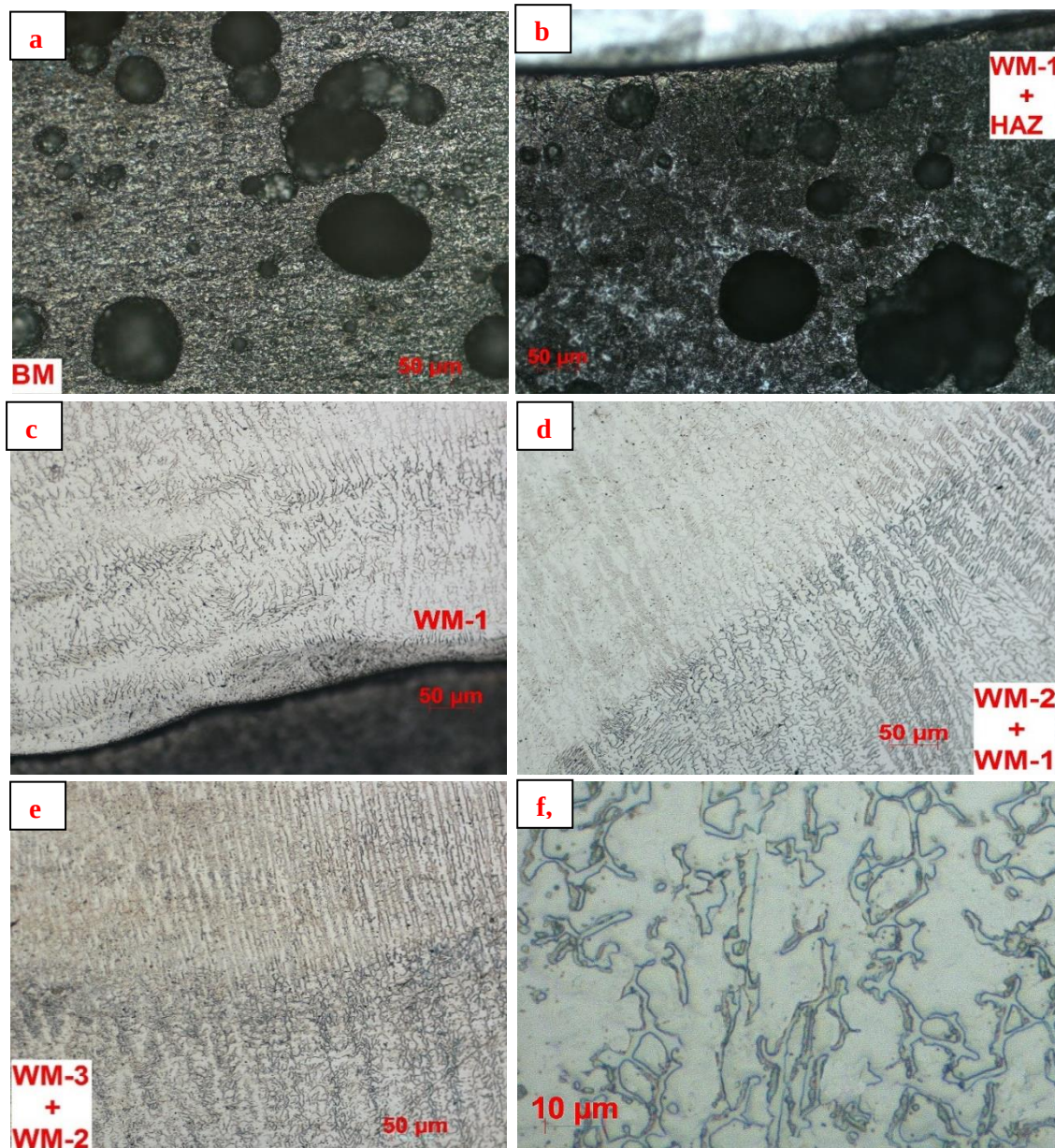
19. ábra: A hegesztett kötés a sópermet vizsgálat előtt



20. ábra: A hegesztett kötés a sópermet vizsgálat után

3.4.4. Mikroszkópos vizsgálat a sópermet vizsgálat után

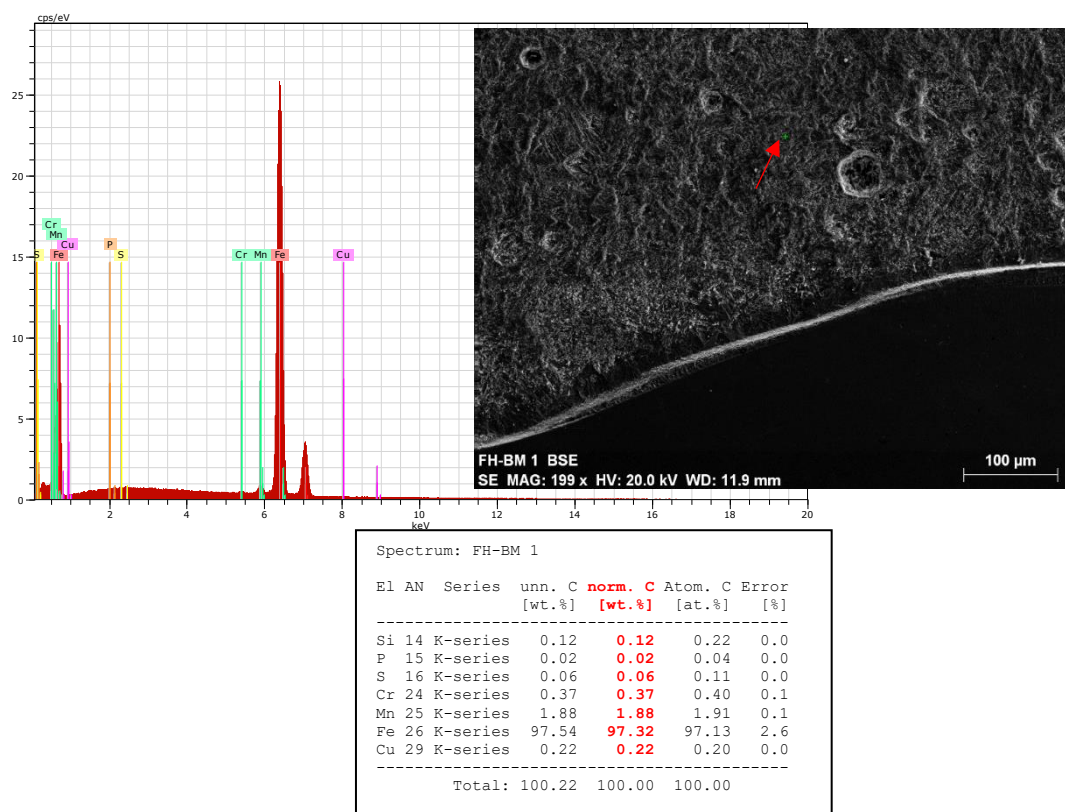
A sópermet vizsgálat után is készítettem mikroszkópos felvételeket, melyek a 21. ábrán láthatók. Egyértelműen látszik az S355J2N acélra tett korróziós hatás, a varrat szövetszerkezetében pedig nem történt változás az erős korrodáló közeg ellenére sem.



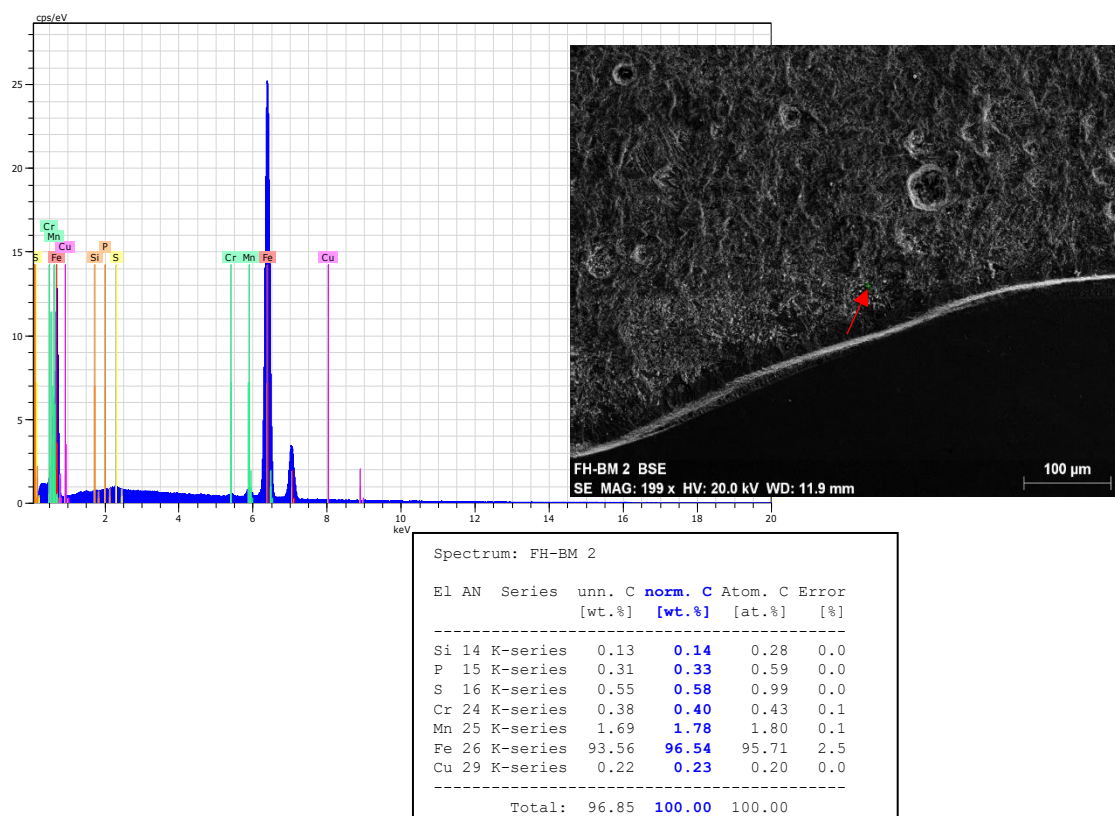
21. ábra: Mikroszkópos felvételek a sópermet vizsgálat után
 a, b, BM – S355J2N alaplemez szövetszerkezete: ferrit+perlit (korrózió nyomai)
 c, WM-1 – 1. réteg szövetszerkezete: delta ferrit + ausztenit
 d, WM-1 és WM-2 – 1. és 2. réteg határa
 e, WM-2 és WM-3 – 2. és 3. réteg határa
 f, WM-3 – 3. réteg szövetszerkezete nagyobb nagyításban: delta ferrit + ausztenit + kisebb karbid szemcsék

3.4.5. Elektronmikroszkópos vizsgálat

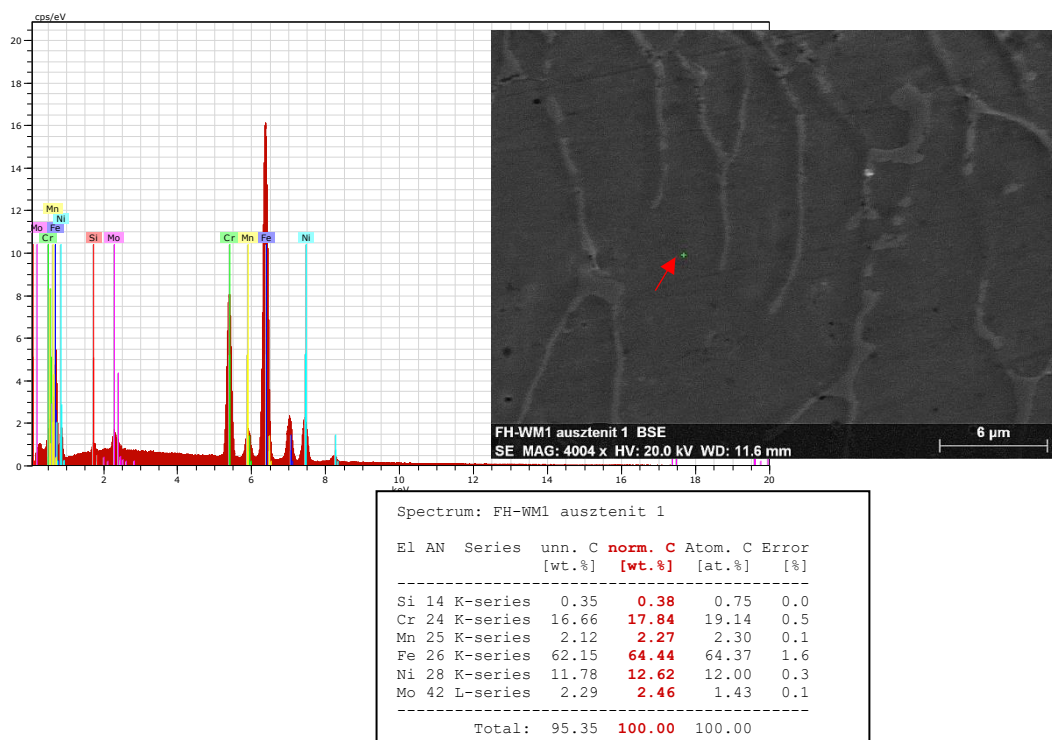
A próbatest részletdúsabb leképezése céljából nagyobb mélységélességgel rendelkező pásztázó elektronmikroszkóppal is készítettem felvételeket. A pásztázó elektronmikroszkóp a szekunder elektronokból alkot képet, így többek között tájékoztatást nyújt a kémiai eloszlásról is. Az EDX vizsgálatokat Bruker röntgen-spektrométeres mikroszondával kiegészített Hitachi 3400N típusú pásztázó elektronmikroszkópon végeztem. A pontelemzések helyét zöld kereszt és piros nyíl jelöli.



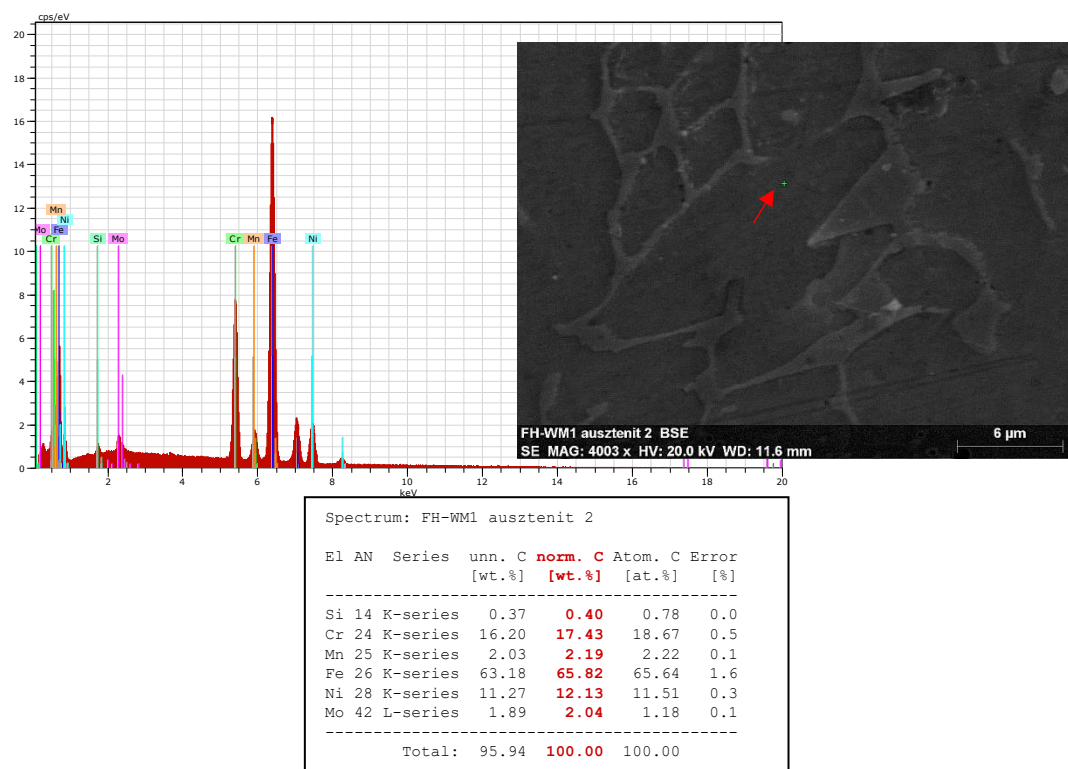
22. ábra: S355J2N 1. pontelemzésének (FH-BM 1) eredményei



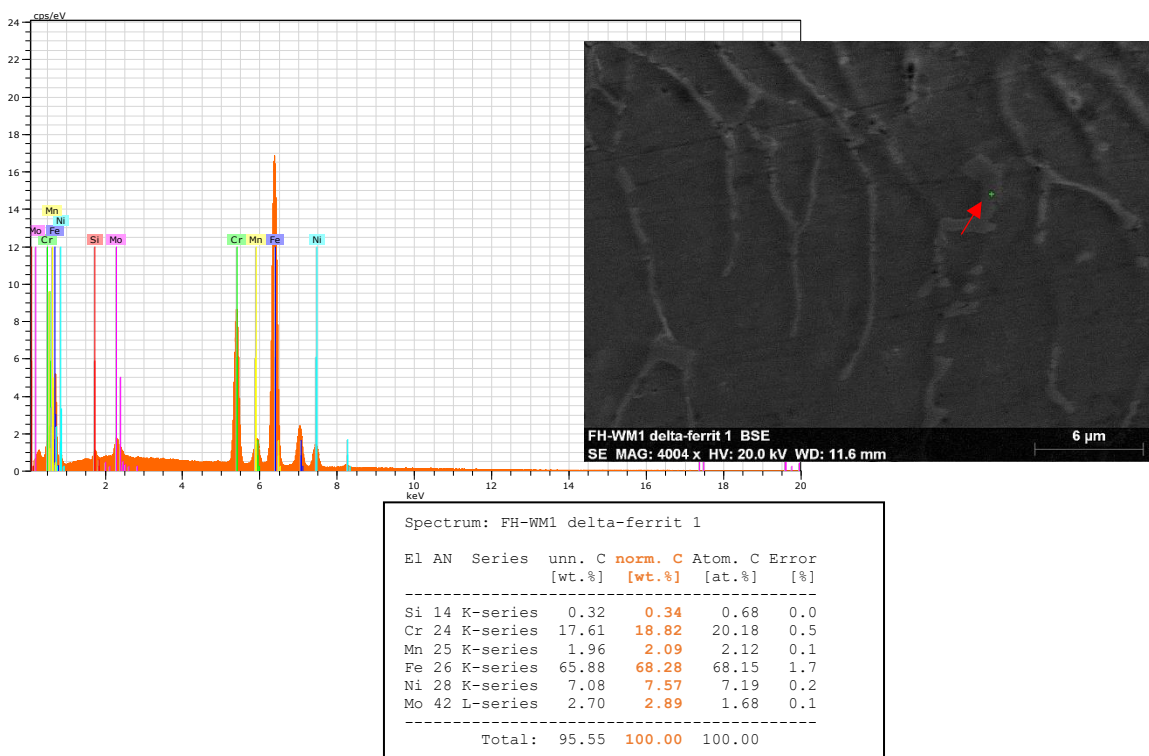
23. ábra: S355J2N 2. pontelemzésének (FH-BM 2) eredményei



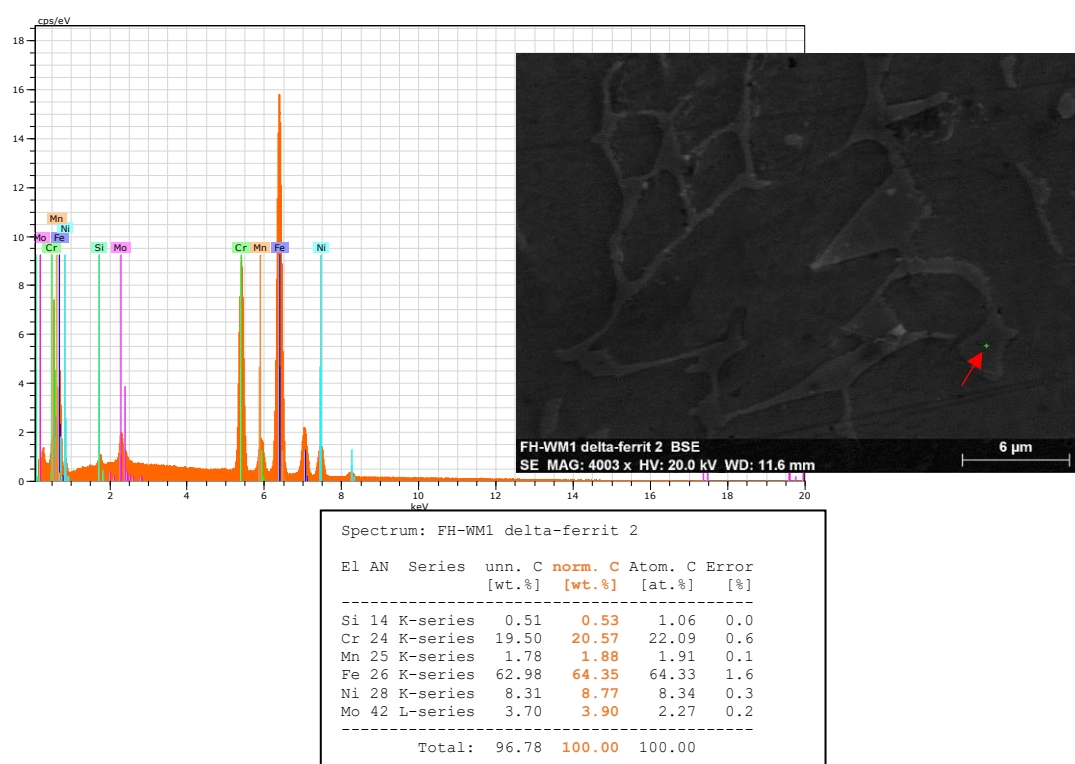
24. ábra: 1. varrat 1. ausztenit pontelemzésének (FH-WM1 ausztenit 1) eredményei



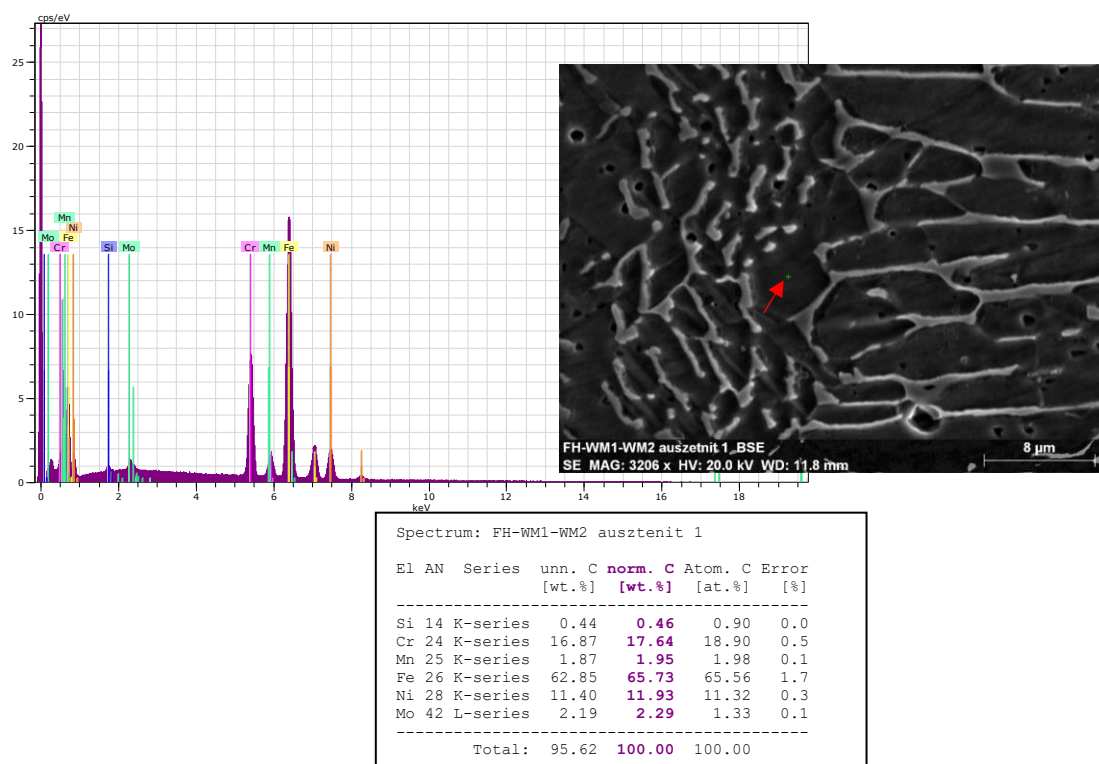
25. ábra: 1. varrat 2. ausztenit pontelemzésének (FH-WM1 ausztenit 2) eredményei



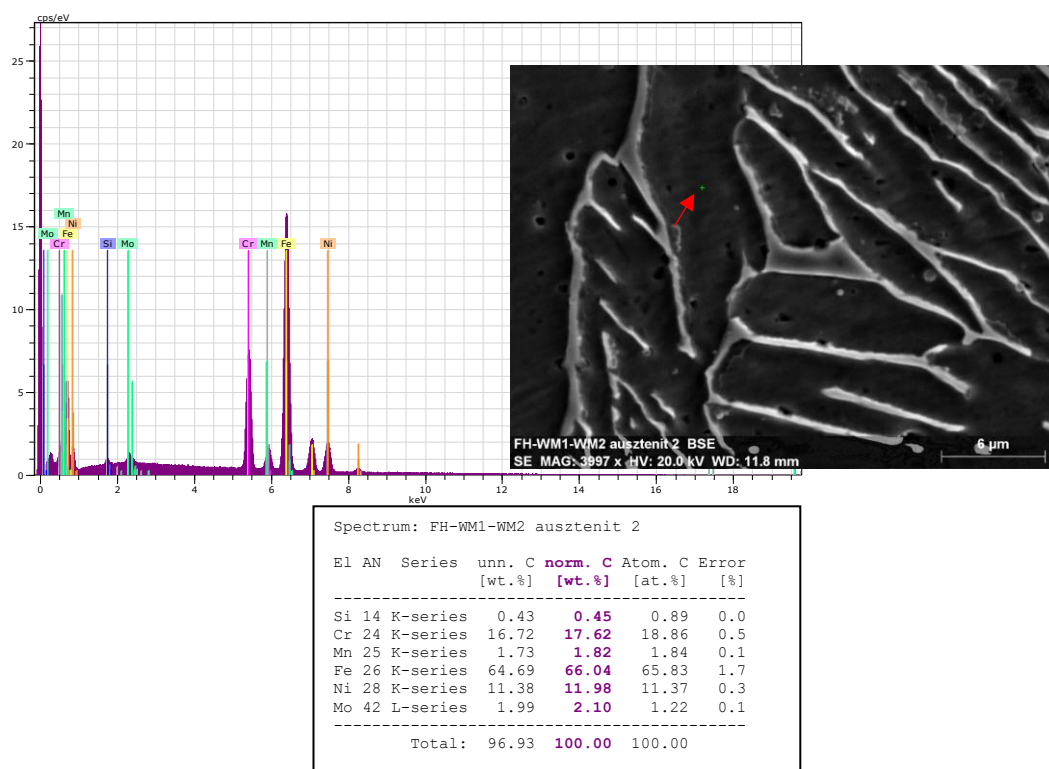
26. ábra: 1. varrat 1. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM1 delta ferrit 1) eredményei



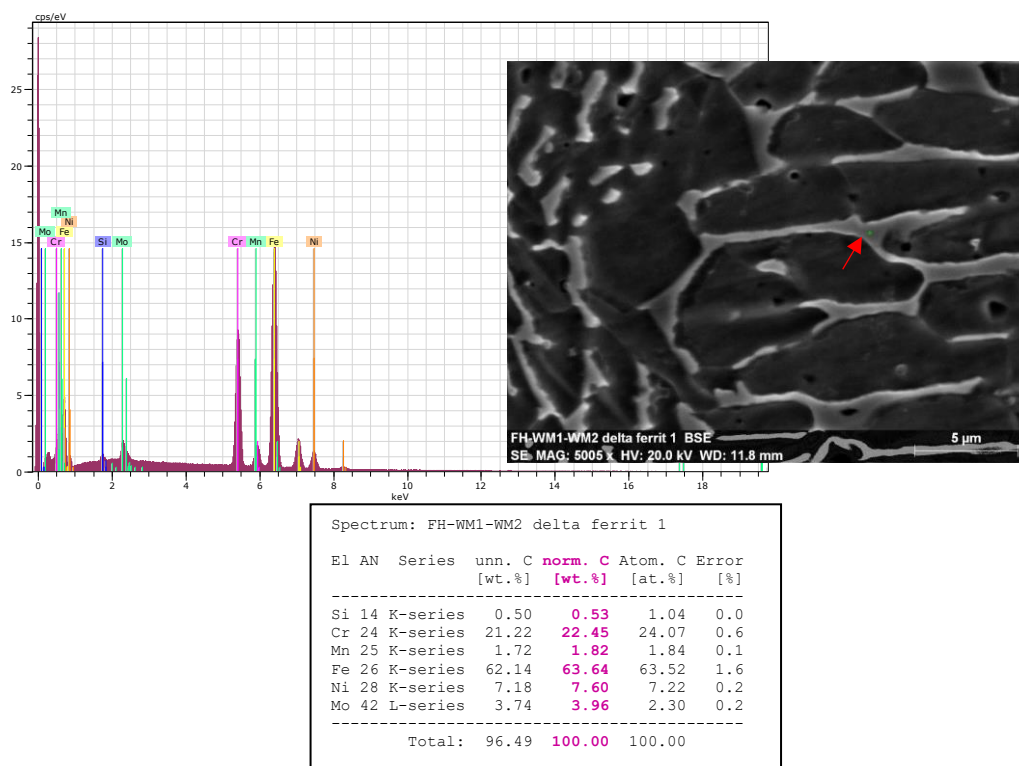
27. ábra: 1. varrat 2. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM1 delta ferrit 2) eredményei



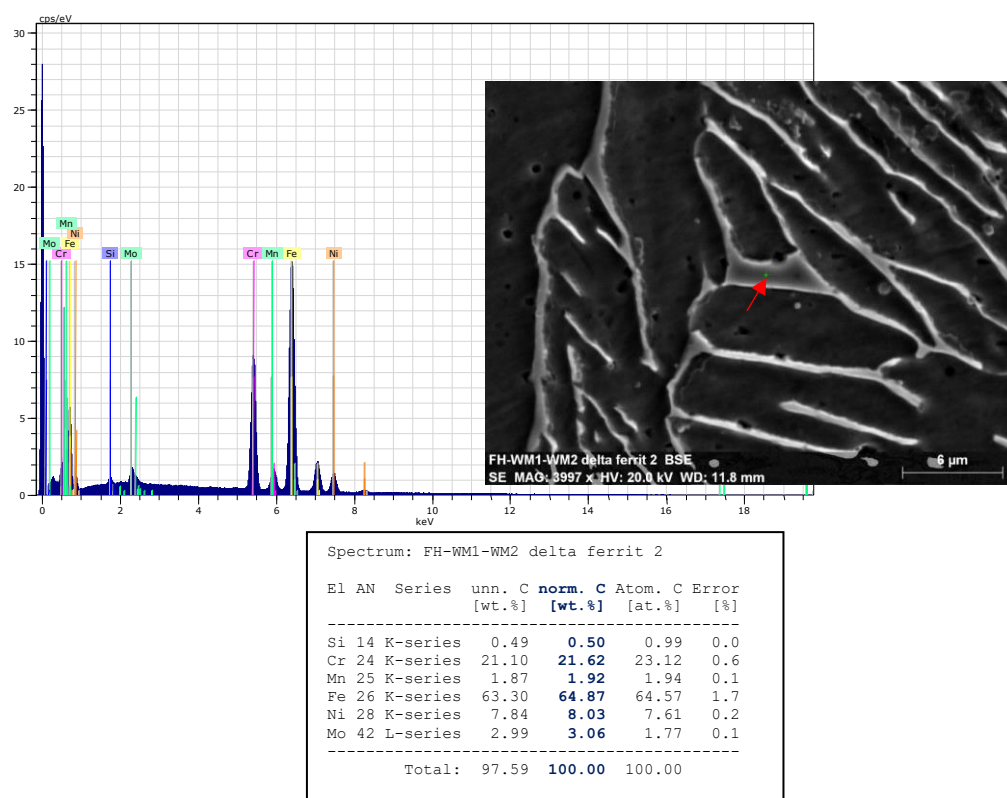
28. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 1. ausztenit pontelemzési (FH-WM1-WM2 ausztenit 1) eredményei



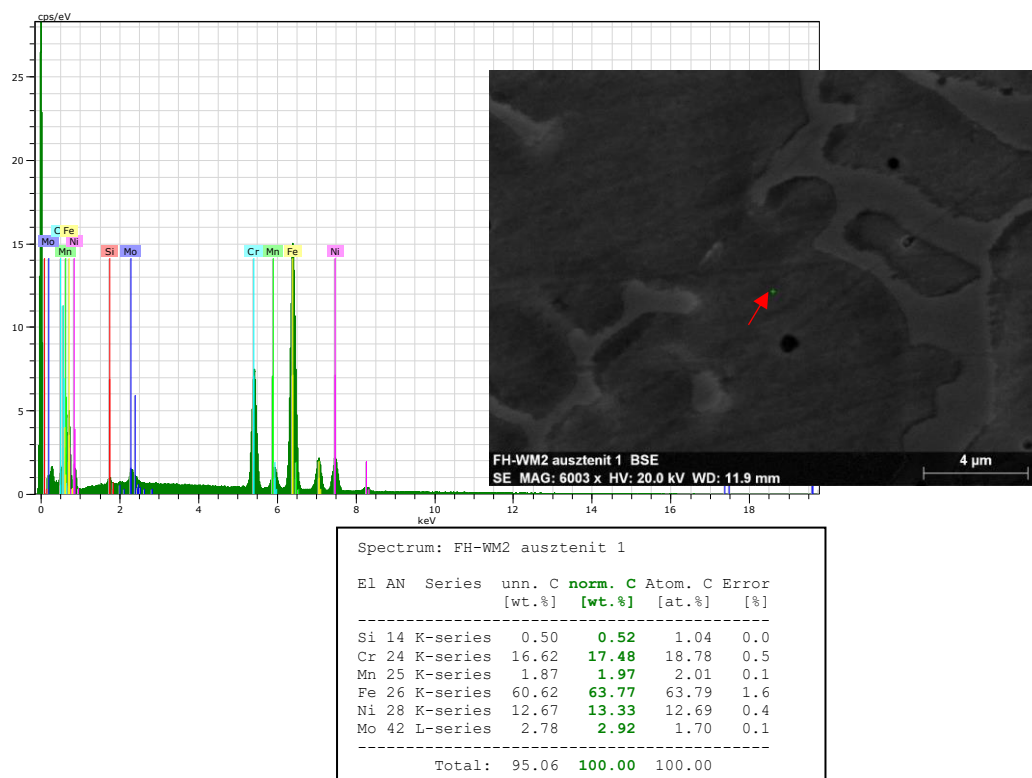
29. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 2. ausztenit pontelemzési (FH-WM1-WM2 ausztenit 2) eredményei



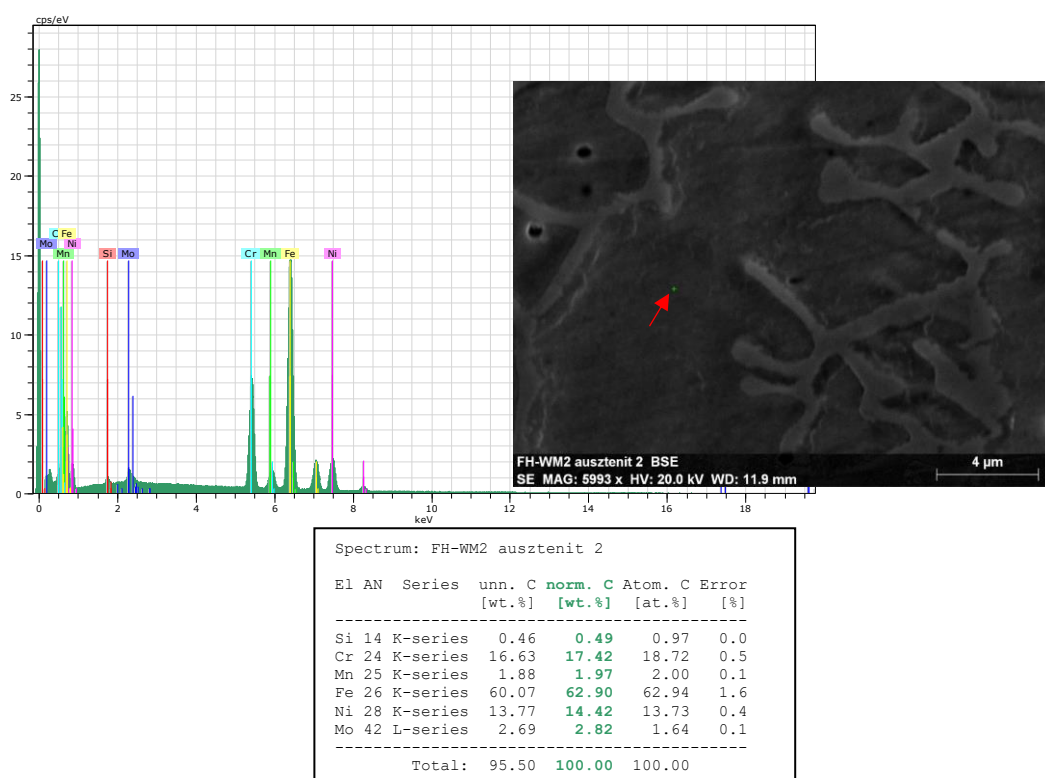
30. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 1. delta ferrit pontelemzési (FH-WM1-WM2 delta ferrit 1) eredményei



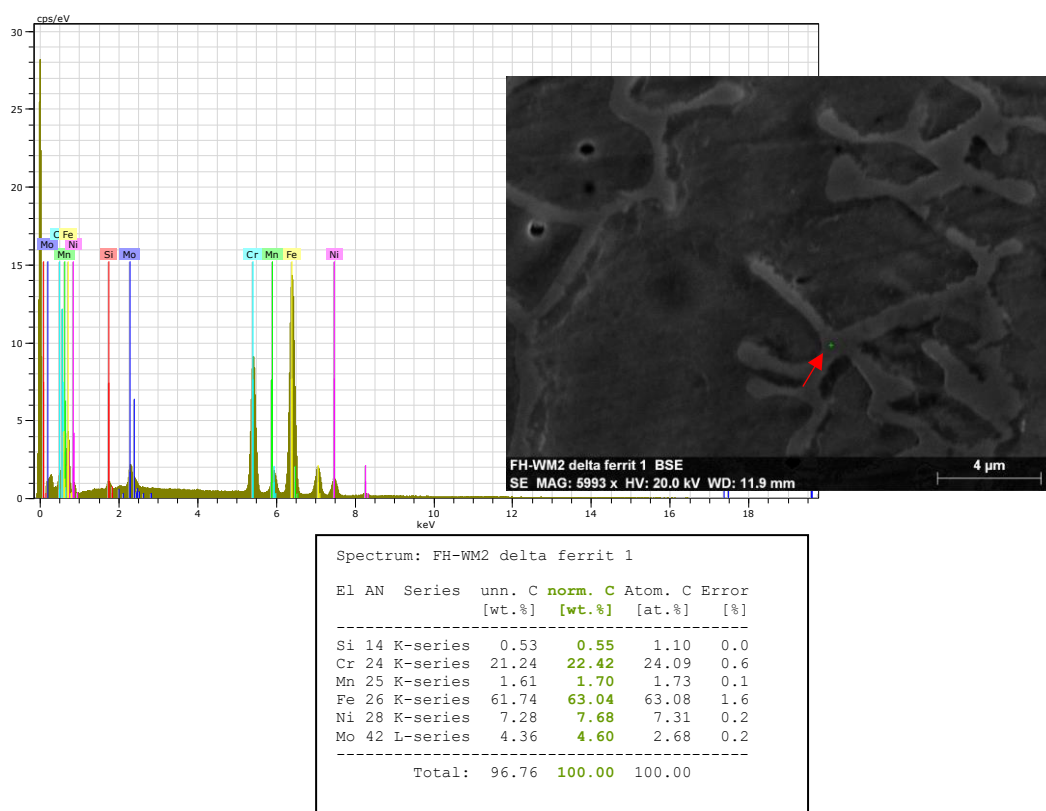
31. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 2. delta ferrit pontelemzése (FH-WM1-WM2 delta ferrit 2) eredményei



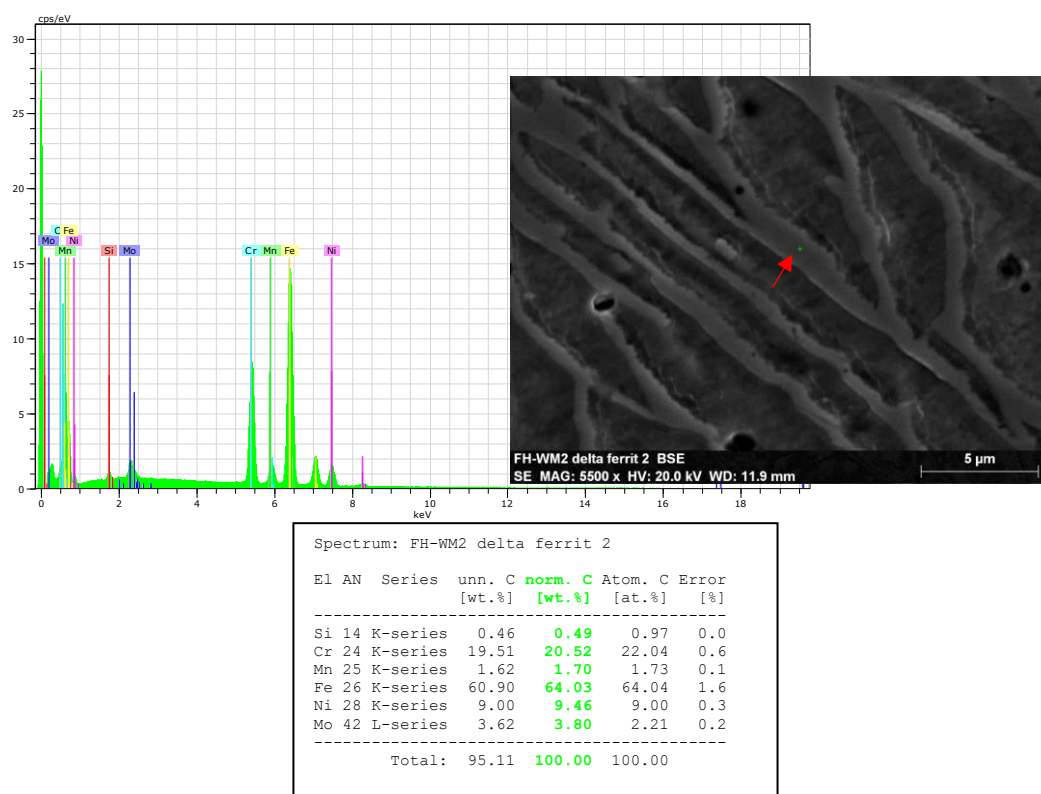
32. ábra: 2. varrat 1. ausztenit pontelemzésének (FH-WM2 ausztenit 1) eredményei



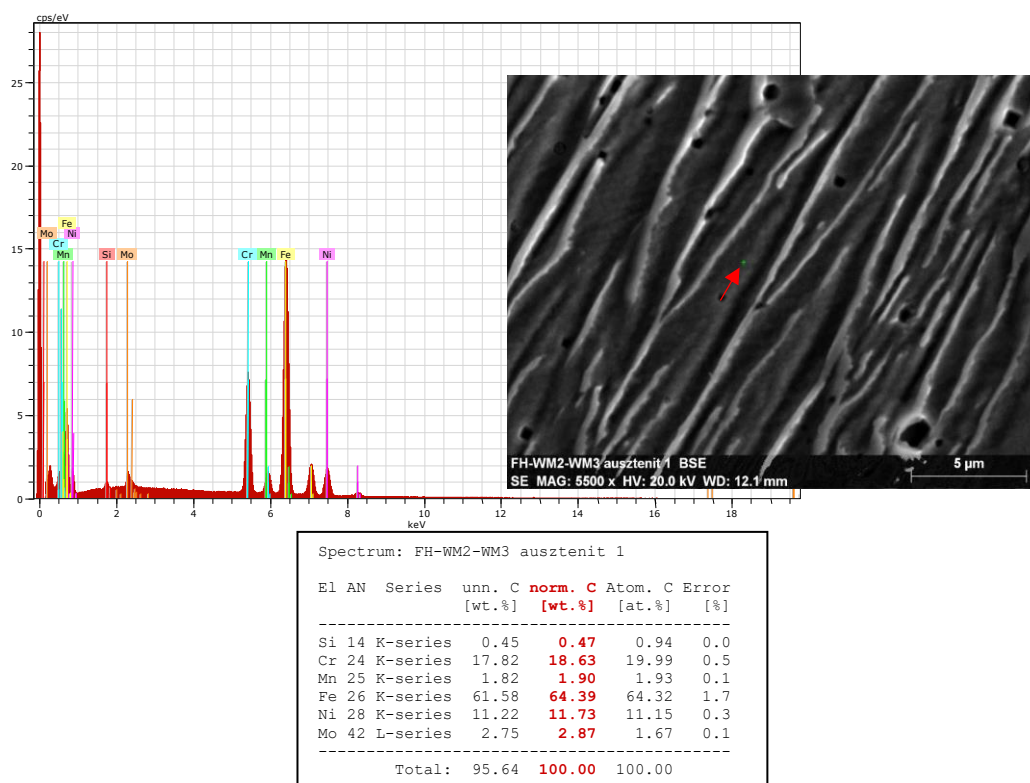
33. ábra: 2. varrat 2. ausztenit pontelemzésének (FH-WM2 ausztenit 2) eredményei



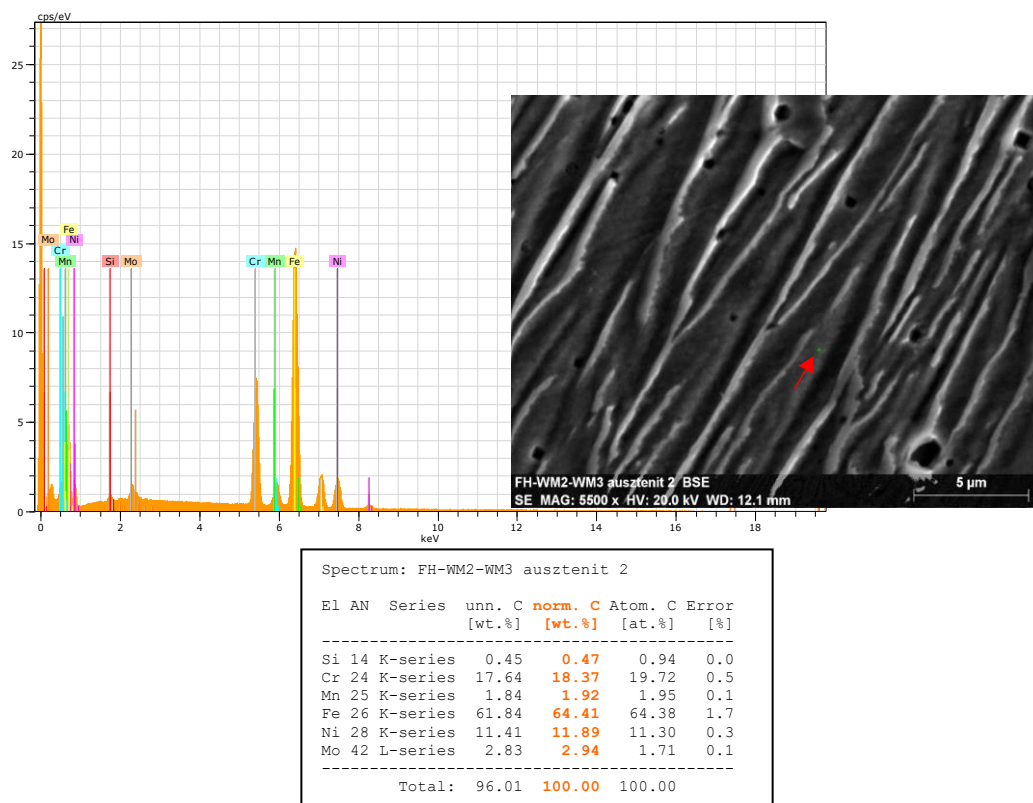
34. ábra: 2. varrat 1. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM2 delta ferrit 1) eredményei



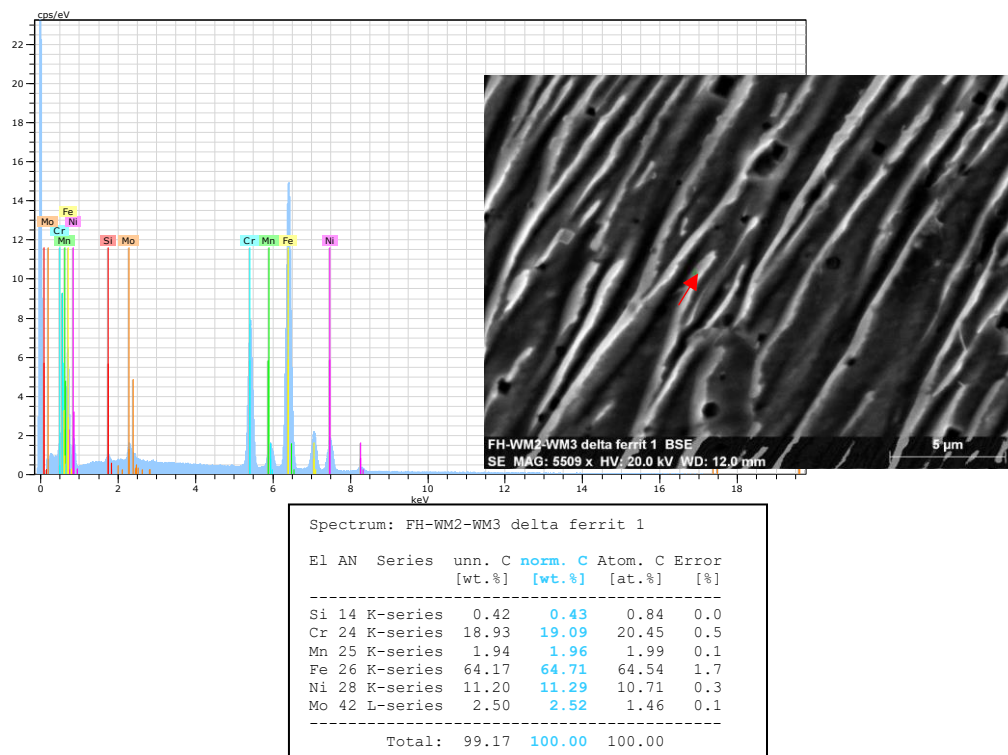
35. ábra: 2. varrat 2. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM2 delta ferrit 2) eredményei



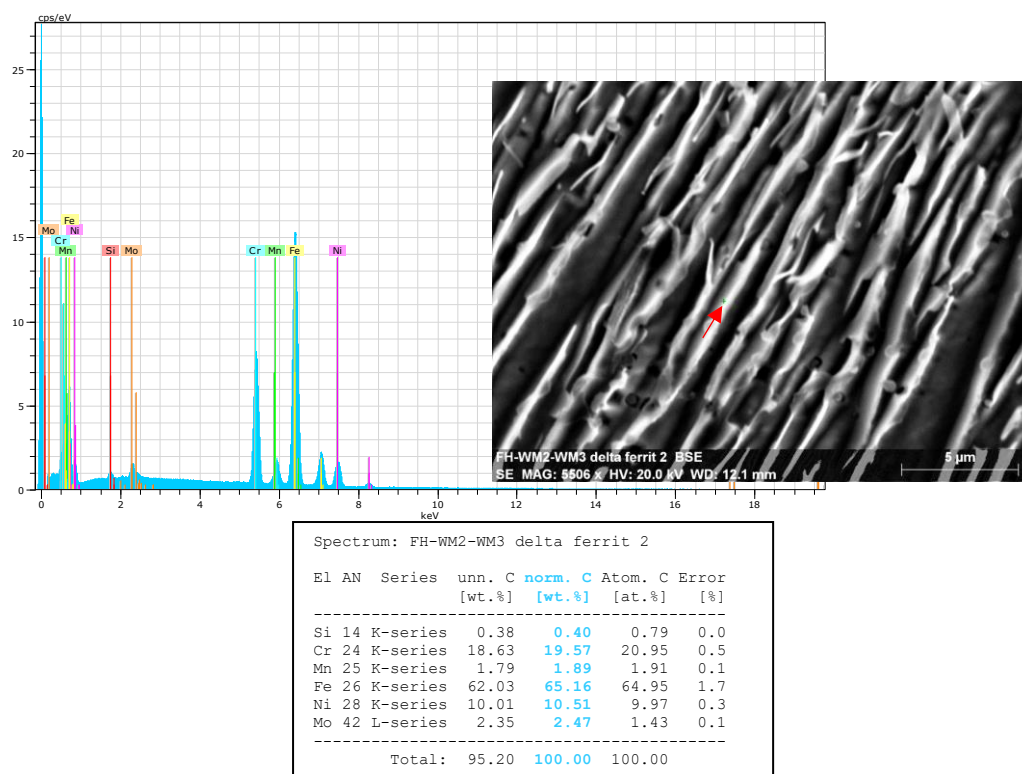
36. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 1. ausztenit pontelemzési (FH-WM2-WM3 ausztenit 1) eredményei



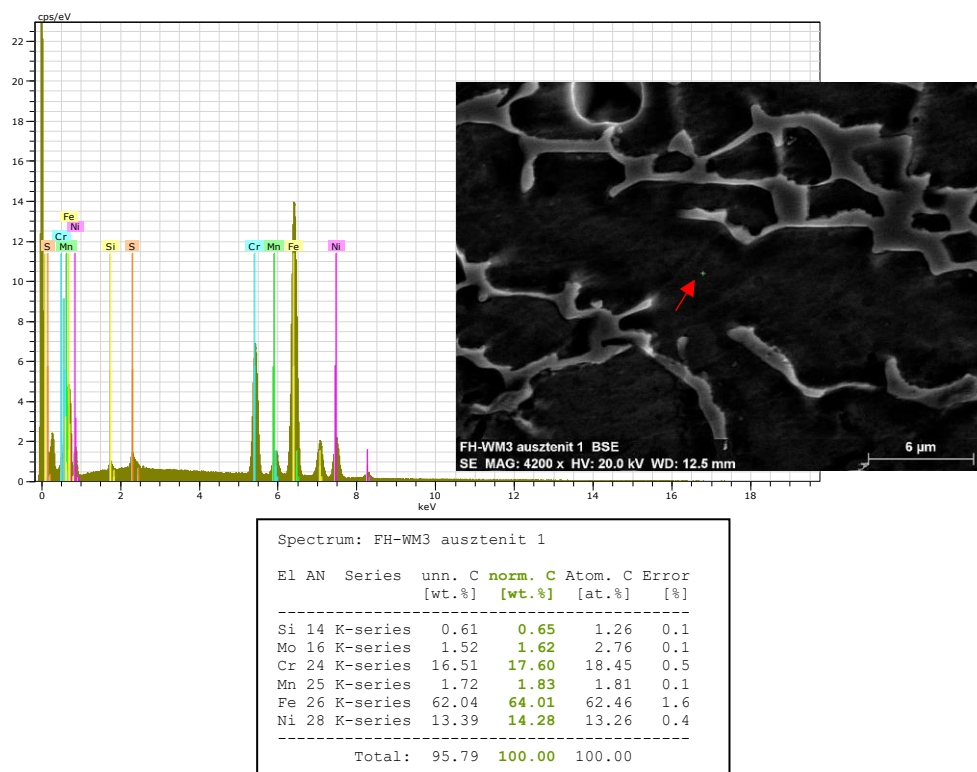
37. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 2. ausztenit pontelemzési (FH-WM2-WM3 ausztenit 2) eredményei



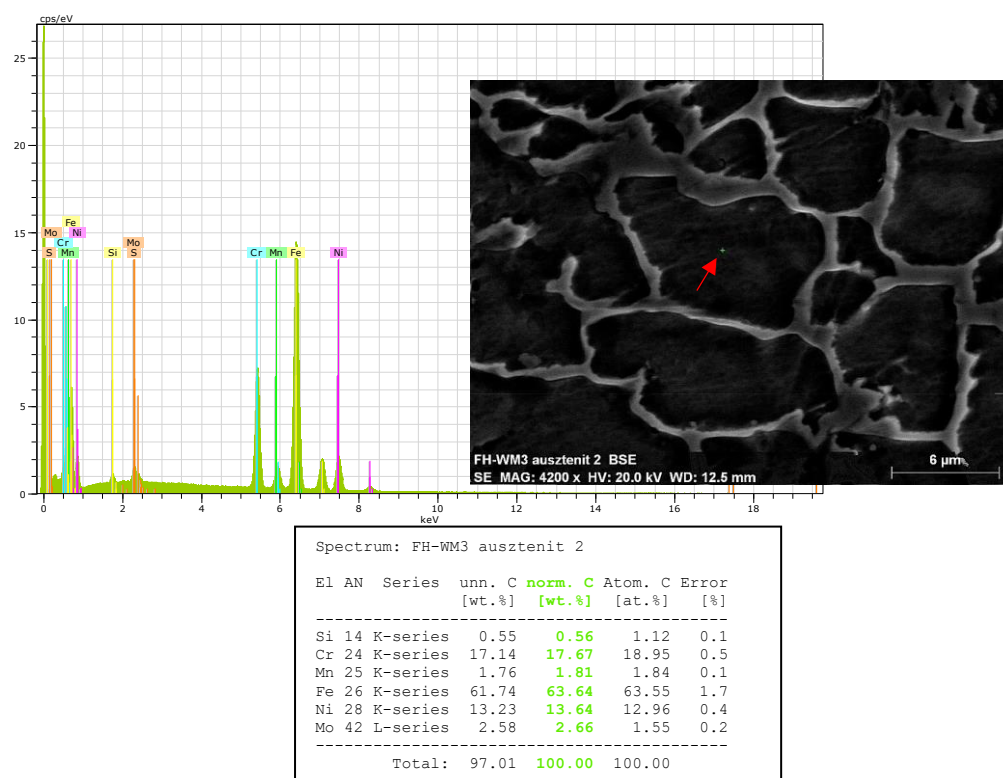
38. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 1. delta ferrit pontelemzési (FH-WM2-WM3 delta ferrit 1) eredményei



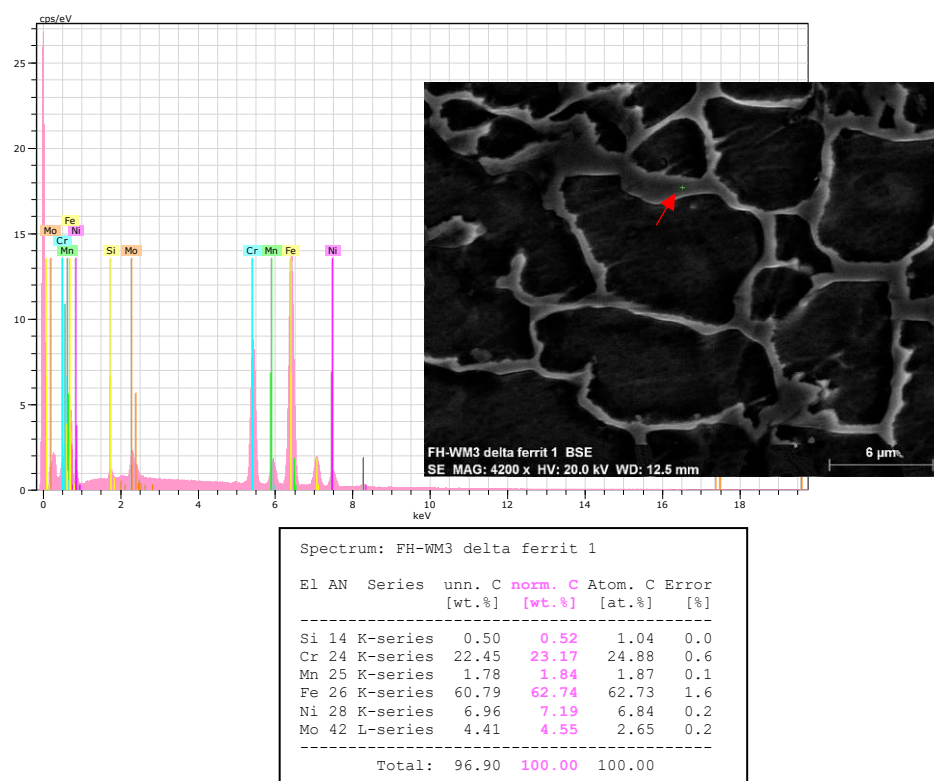
39. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 2. delta ferrit pontelemzése (FH-WM2-WM3 delta ferrit 2) eredményei



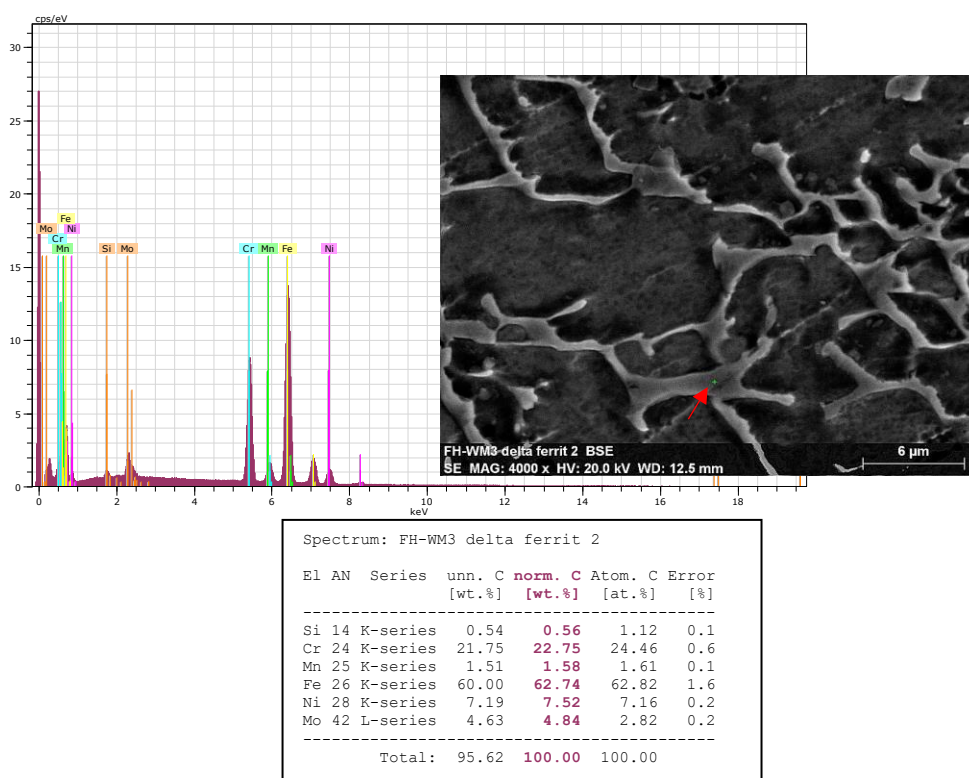
40. ábra: 3. varrat 1. ausztenit pontelemzésének (FH-WM3 ausztenit 1) eredményei



41. ábra: 3. varrat 2. ausztenit pontelemzésének (FH-WM3 ausztenit 2) eredményei



42. ábra: 3. varrat 1. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM3 delta ferrit 1) eredményei

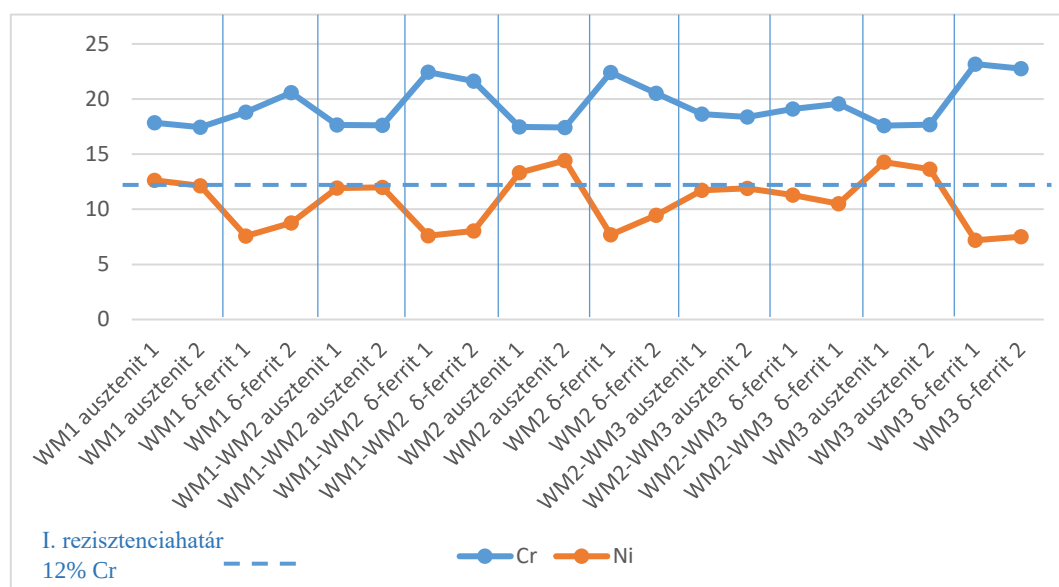


43. ábra: 3. varrat 2. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM3 delta ferrit 2) eredményei

Az eredmények könnyebb áttekinthetősége érdekében táblázatban is összegyűjtöttem az egyes ötvöző tartalmakat, valamint diagramban ábrázoltam az értékeket.

8. táblázat: pontelemzések összefoglalása

	Cr	Ni	Mo	Mn	Fe	Si	S	P	Cu
	%								
BM 1	0,37	-	-	1,88	97,32	0,12	0,06	0,02	0,22
BM 2	0,40	-	-	1,78	96,54	0,14	0,58	0,33	0,23
WM1 ausztenit 1	17,84	12,62	2,46	2,27	64,44	0,38	-	-	-
WM1 ausztenit 2	17,43	12,13	2,04	2,19	65,82	0,40	-	-	-
WM1 δ -ferrit 1	18,82	7,57	2,89	2,09	68,28	0,34	-	-	-
WM1 δ -ferrit 2	20,57	8,77	3,90	1,88	64,35	0,53	-	-	-
WM1-WM2 ausztenit 1	17,64	11,93	2,29	1,95	65,73	0,46	-	-	-
WM1-WM2 ausztenit 2	17,62	11,98	2,10	1,82	66,04	0,45	-	-	-
WM1-WM2 δ -ferrit 1	22,45	7,60	3,96	1,82	63,64	0,53	-	-	-
WM1-WM2 δ -ferrit 2	21,62	8,03	3,06	1,92	64,87	0,50	-	-	-
WM2 ausztenit 1	17,48	13,33	2,92	1,97	63,77	0,52	-	-	-
WM2 ausztenit 2	17,42	14,42	2,82	1,97	62,90	0,49	-	-	-
WM2 δ -ferrit 1	22,42	7,68	4,60	1,70	63,04	0,55	-	-	-
WM2 δ -ferrit 2	20,52	9,46	3,80	1,70	64,03	0,49	-	-	-
WM2-WM3 ausztenit 1	18,63	11,73	2,87	1,90	64,39	0,47	-	-	-
WM2-WM3 ausztenit 2	18,37	11,89	2,94	1,92	64,41	0,47	-	-	-
WM2-WM3 δ -ferrit 1	19,09	11,29	2,52	1,96	64,71	0,43	-	-	-
WM2-WM3 δ -ferrit 2	19,57	10,51	2,47	1,89	65,16	0,40	-	-	-
WM3 ausztenit 1	17,60	14,28	1,62	1,83	64,01	0,65	-	-	-
WM3 ausztenit 2	17,67	13,64	2,66	1,81	63,64	0,56	-	-	-
WM3 δ -ferrit 1	23,17	7,19	4,55	1,84	62,74	0,52	-	-	-
WM3 δ -ferrit 2	22,75	7,52	4,84	1,58	62,74	0,56	-	-	-



44. ábra: Cr és Ni eloszlása a rétegekben és keveredési zónákban

Alapvetően minden alapanyagban és keveredési zónában végeztem 2-2 pontelemzést. Az egyes szövetelemekben (ausztenitben, delta ferritben) található ötvözőeloszlás érdekelt részletesen. A felvételeken látható kisebb karbidokat, elszórt salakzárványokat és pórusokat is megvizsgáltam, de ezek száma olyan csekély, hogy nem játszanak fontos szerepet a szövetszerkezet megítélésében, így nem szerepelnek a mérési eredmények között.

Az elektronmikroszkóppal végzett kémiai analízis alapján az első varratban az alábbi módon alakult az átlagos ötvözőtartalom:

- krómtartalom 18,67 %,
- nikkeltartalom 10,27 %,
- molibdéntartalom 2,82 %,
- mangántartalom 2,11 %.

Az első és második varrat, tehát a két minimálisan különböző hozaganyag keveredési zónájában az átlagos ötvözőtartalom:

- krómtartalom 19,83 %,
- nikkeltartalom 9,89 %,
- molibdéntartalom 2,85 %,
- mangántartalom 1,88 %.

Ezek az adatok abból a hőzónából származnak, ahol a hegesztési folyamat vonalenergiája azonos az alapanyag és az első réteg hegesztésekor alkalmazottéval (0,88-0,95 KJ/mm). Ezek az értékek a króm- és molibdéntartalmat tekintve lényegében azonosak a második hozaganyag (316 L – T0) összetételével. Megfigyelhető azonban, hogy a nikkeltartalom több mint 2 %-kal alulteljesített, a mangántartalom pedig közel 4 tized százalékkal meghaladta a hozaganyag referenciaértékét.

A diagramon ábrázolt tendencia azt mutatja, hogy az ausztenit mátrixban kevesebb a krómtartalom, mint a delta ferritben, de nem szegényedik el jelentősen az ausztenit, ami igazolja a krómkarbid kiválás veszélyének kizárását. A krómtartalom egyik mérési pontban sem esett az I. rezisztenciahatár (12%) alá, ami biztosítja a korrózióval szembeni passzivitást.

A nikkeltartalom ingadozása viszont már kérdéseket vet fel. Nyilván ausztenitképző ötvözőként több nikkeltartalom figyelhető meg az ausztenites mátrixban, de a delta ferritben egyes mérési pontokon 7,6 % alá süllyed az aránya. A nikkel a ferritben szubsztitúciósan oldódik, azaz a ferrit feloldja a nikkelt. A delta ferrit mennyisége tehát befolyásolja a nikkel részarányát, vagyis egy adott mennyiségű delta ferrit képződése után már jelentősen romlik korrózióállósága az anyagnak. Korrózióállóság szempontjából a nikkel a második legfontosabb ötvözője az ausztenites korrózióálló acéloknak, így rendkívüli figyelmet igényel az optimális mennyiség elérése. Minél kisebb a nikkeltartalom, annál nagyobb a feszültségi korróziós hajlam veszélye. A mangántartalom többletmennyisége ebből a szempontból ideális, hiszen ausztenitképző ötvözőként a gyakorlatban is mangánnal helyettesítik a nikkel egy részét. Ez a többlet mennyiség azonban nem kompenzálja a nikkel ilyen jelentős mértékű hiányát.

4. Eredmények

Az elvégzett vizsgálatok bizonyították, hogy a keveredés az első és második réteg között alacsony értékű, (kb. 30%), és ez azt is jelenti, hogy a korrózióállóság fémtani feltételei már ebben a zónában megfigyelhetők. Az általunk választott anyagpárosítással végzett felrakó hegesztés a 2. hegesztett rétegtől FN10-15 ferritszámú ausztenites szövetet biztosít, viszont a delta ferrit jelenléte csökkenti a nikkel mennyiségét, ezáltal növelve a korrózió veszélyét.

A hegesztési próbadarabokon a várhatóan nagyobb hőbevitel okozta alakváltozásokat tapasztaltunk. A felrakott rétegek lágyak, felkeményedés, karbidkiválás okozta keményrétegek nem figyelhetők meg.

A 2. felrakott réteg ferritszáma már közel azonos a 3. rétegével, emiatt a felrakott réteg vastagságát, (felrakások rétegszámát) az üzemi körülmények dönthetik el. A 2. rétegtől az FN értéke elérte a 10-15 értéket, ami még megfelelő korróziós-ellenállást biztosít, viszont ebben a párosításban ideálisabb lenne egy alacsonyabb ferritszám elérése.

A hegesztőanyagok keveredése, karbideloszlása egyenletes, az alapanyaggal határos hőhatás övezetben szenzibilizációra utaló karbidkiválás, és szemcsehatár menti dúsulás nem tapasztalható.

A hegesztési utasítás paraméterei alkalmasak a robottal történő, szabályozott hőbevitelű eljárások alkalmazására. Az alkalmazott vonalenergia jelentős megváltoztatása csak a hűlési viszonyok fokozott ellenőrzése mellett javasolt. A korrózióálló acélok hegesztése rendkívüli mértékben kényes a tisztaságra, és a megfelelő üzemi körülményekre.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban az S355J2N acél tulajdonságjavító felrakó hegesztését vizsgáltam. Az alkalmazott szerkezeti acél a GINOP-2.2.1-18-2020-00027 számú projekt keretein belül kidolgozott olajkitermelő egység alapanyagra vonatkozó igényeit tekintve megfelelő szilárdsággal rendelkezik, de korrózióállósága nem teljesíti az elvárásokat.

Célom az volt, hogy átfogó képet kapjak az S355J2N szerkezeti acélon végzett korrózióálló bevonatok felrakó hegesztésének technológiai előnyeiről. Szűkebb vizsgálati területeimet a porbeles huzalelektrodás, védőgázos robottechnológiával végzett kísérletek képezték.

Vizsgálataim nagyrészt mikroszkópos területen zajlottak, hiszen a korrózióállóságot döntően befolyásoló változások (kiválások, dúsulások) szinte mindig mikroszerkezeti dimenziókban kezdődnek. Dolgozatom a keménységmérésen kívül egyéb mechanikai vizsgálatra nem terjedt ki. A sópermet vizsgálat után minden rétegben és keveredési zónában vizsgáltam az ötvözők arányát, különös hangsúlyt fektetve a króm (Cr) és nikkel (Ni) mennyiségének alakulására.

Az alaplemez síkja felett az összes rétegben magasan az I. rezisztenciahatár ($Cr > 12\%$) felett volt a krómtartalom, így ipari korrózióállóságot sikerült elérni a hegesztés során. Továbbá a korrózióállóság fémtani feltételei már az első keveredési zónában megfigyelhetők. A költséghatékony alkalmazás szempontjából tehát nem indokolt három réteg felrakása, viszont két rétegre mindenképp szükség van, hiszen az első réteg tisztán ausztenites párnaréteggént szolgált. A valóságban azonban heterogén (ausztenit mátrix + delta ferrit) szövetszerkezet alakul ki, ami egyfajta kompromisszum, hiszen ezáltal egyesíthetők korróziós szempontból a ferrites és ausztenites szövet előnyei. Nyilván ez a kompromisszum megköveteli, hogy biztonsággal kézben tartsuk ezeket az inhomogenitásokat a megfelelő technológia megválasztásával.

Kutatásom legfontosabb konklúziója, hogy az inhomogenitás következtében szignifikáns kapcsolatrendszer fedeztem fel a nikkeltartalom és a ferritszám (FN) között. A ferrit ugyanis oldja a nikkelt, tehát egy adott mennyiségű delta ferrit képződése után a varrat korrózióállósága már jelentősen romlik.

Ahhoz, hogy pontosabb képet kapjunk erről az jelenségről, további hegesztési kísérletekre és vizsgálatokra van szükség.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Balogh, J. Lukács és I. Török, *Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai*, Miskolc: Miskolci Egyetem, 2015.
- [2] J. Dr. Gáti, *Hegesztési Zsebkönyv*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1995.
- [3] I. Dr. Baránszky-Jób, *Hegesztési Kézikönyv*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [4] I. T. Török, „EUROCORR 2021 – Harcolni a korrózió ellen is kell,” *Bányászati és Kohászati Lapok*, pp. 4-6., 2021.
- [5] M. Váradi, *Párnaréteg alkalmazásának vizsgálata melegsíllárd acélok esetén*, Miskolc: Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, 2018.
- [6] G. Bagyinszki és K. Losonci, „Korrózióállóság minősítése képelemző szoftver alkalmazásával,” *Műszaki tudományos közlemények* 7., pp. 87-90, 2017.
- [7] L. Dr. Szunyogh, *Hegesztés és rokon technológiák*, Budapest: Gépipari Tudományos Egyesület, 2007.
- [8] K. Borko, B. Hadzima és F. Pastorek, „The corrosion properties of S355J2 Steel Welded Joint in Chlorides Environment,” *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, pp. 342-347, 2019.
- [9] *MSZ EN ISO 10025-2:2020*
- [10] J. Kovács, P. R. Sisodia és M. Gáspár, „Hőhatásövezeti zónák fizikai szimulációja nagy szilárdságú szerkezeti acélok esetén,” *Multidiszciplináris tudományok*, pp. 152-166., 2019.
- [11] M. F. McGuire, „Stainless Steels for Design Engineers,” Ohio, ASM International, 2008, pp. 1-10.
- [12] K. Dr. Bödök, *Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére*, Budapest: Corweld Kiadó, 1997.
- [13] H. Vashishtha, V. R. Taiwade, K. R. Khatirkar, A. V. Ingle és R. K. Dayal, „Welding behaviour of low nickel chrome-manganese stainless steel,” *ISIJ International*, pp. 1361-1367, 2014.
- [14] R. F. Mehl, *METALS HANDBOOK - Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*, Ohio: American Society For Metals, 1972.
- [15] M. Dr. Kovács, *Hegesztés*, Budapest: Tankönyvmester Kiadó, 2013.
- [16] G. Dr. Bagyinszki és M. Dr. Kovács, *Gépipari alapanyagok és félkész gyártmányok*, Budapest: Tankönyvmester Kiadó, 2008.
- [17] „Filler Metals Bestseller for Joining Applications,” Böhler, [Online]. Available: www.voestalpine.com/welding.

- [18] M. Gáspár és P. R. Sisodia, „Weldability analysis of Q+T and TMCP high strength steels by physical simulation,” in *70th IIW Annual Assembly and International Conference*, Shanghai, 2017.

Ábrajegyzék

1. ábra: Graville diagram [18]	10
2. ábra: A Cr tartalom korrózióállóságra tett hatása [5]	11
3. ábra: Krómkarbid kiválások egy ausztenites acél szövetszerkezetében [14]	13
4. ábra: 1077 C°-on hőkezelt és vízzel hűtött ausztenites acél szövetszerkezete [14]	13
5. ábra: Az ötvözőelemek hatása a γ -mezőre [2] a, nyitott γ -mező, ausztenitképző (Ni, Mn, Co); b, és d, zárt γ -mező; c, zárt γ -mező, ferritképző (Cr, Al, Si, Ti, Mo, V, W)	14
6. ábra: Schaeffler-diagram [15] x – szemcsedurvulási veszély $T > 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$; --- σ -fázis kiválási veszély 500-900 $^{\circ}\text{C}$ között; • - • melegrepedési veszély $T > 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$; ° - ° hidegrepedési veszély 400 $^{\circ}\text{C}$ körül	15
7. ábra: WRC-92 diagram [7]	18
8. ábra: DeLong diagram [7]	18
9. ábra: IGM KUKA RTE-4 hegesztőrobot a perifériákkal és a befogógységekkel	19
10. ábra: Az alapanyag és az 1. réteg közti keveredés Schaeffler-diagramban történő ábrázolása	24
11. ábra: Az alapanyag és az 1. réteg közti keveredés WRC-92 diagramban történő ábrázolása	24
12. ábra: Az 1. réteg és a 2. réteg közti keveredés Schaeffler-diagramban történő ábrázolása	25
13. ábra: A 2. réteg WRC-92 diagramban történő ábrázolása.....	25
14. ábra: A próbatestről készült fotók különböző nézőpontból	26
15. ábra: A csiszolatok makroszkópos felvételei BM – S355J2N alaplemez WM-1 – 1. réteg (309LMo-T0) WM-2 – 2. réteg (316L-T0) WM-3 – 3. réteg (316L-T0)	28
16. ábra: Mikroszkópos felvételek: a, BM – S355J2N alaplemez szövetszerkezete: ferrit+perlit b, c, WM-1 – 1. réteg szövetszerkezete: kevés delta ferrit + ausztenit d, WM-1 és WM-2 – 1. és 2. réteg határa e, WM-2 és WM-3 – 2. és 3. réteg határa f, WM-3 – 3. réteg szövetszerkezete: delta ferrit + ausztenit g, WM3 szövetszerkezete nagyobb felbontásban	29
17. ábra: Elektronmikroszkópos felvételek a keveredési zónákról 1. varratban 5 FN, 2. varratban 15 FN.....	30

18. ábra: Keménységmérési pontok helyei és a keménységmérési diagram.....	31
19. ábra: A hegesztett kötés a sópermet vizsgálat előtt.....	32
20. ábra: A hegesztett kötés a sópermet vizsgálat után	32
21. ábra: Mikroszkópos felvételek a sópermet vizsgálat után a, b, BM – S355J2N alaplemez szövetszerkezete: ferrit+perlit (korrózió nyomai)	33
22. ábra: S355J2N 1. pontelemzésének (FH-BM 1) eredményei.....	34
23. ábra: S355J2N 2. pontelemzésének (FH-BM 2) eredményei.....	35
24. ábra: 1. varrat 1. ausztenit pontelemzésének (FH-WM1 ausztenit 1) eredményei.....	35
25. ábra: 1. varrat 2. ausztenit pontelemzésének (FH-WM1 ausztenit 2) eredményei.....	36
26. ábra: 1. varrat 1. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM1 delta ferrit 1) eredményei	36
27. ábra: 1. varrat 2. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM1 delta ferrit 2) eredményei	37
28. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 1. ausztenit pontelemzési (FH-WM1-WM2 ausztenit 1) eredményei.....	37
29. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 2. ausztenit pontelemzési (FH-WM1-WM2 ausztenit 2) eredményei.....	38
30. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 1. delta ferrit pontelemzési (FH-WM1-WM2 delta ferrit 1) eredményei	38
31. ábra: 1. és 2. varrat keveredési zónájának 2. delta ferrit pontelemzési (FH-WM1-WM2 delta ferrit 2) eredményei	39
32. ábra: 2. varrat 1. ausztenit pontelemzésének (FH-WM2 ausztenit 1) eredményei.....	39
33. ábra: 2. varrat 2. ausztenit pontelemzésének (FH-WM2 ausztenit 2) eredményei.....	40
34. ábra: 2. varrat 1. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM2 delta ferrit 1) eredményei	40
35. ábra: 2. varrat 2. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM2 delta ferrit 2) eredményei	41
36. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 1. ausztenit pontelemzési (FH-WM2-WM3 ausztenit 1) eredményei.....	41
37. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 2. ausztenit pontelemzési (FH-WM2-WM3 ausztenit 2) eredményei.....	42
38. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 1. delta ferrit pontelemzési (FH-WM2-WM3 delta ferrit 1) eredményei	42
39. ábra: 2. és 3. varrat keveredési zónájának 2. delta ferrit pontelemzési (FH-WM2-WM3 delta ferrit 2) eredményei	43
40. ábra: 3. varrat 1. ausztenit pontelemzésének (FH-WM3 ausztenit 1) eredményei.....	43
41. ábra: 3. varrat 2. ausztenit pontelemzésének (FH-WM3 ausztenit 2) eredményei.....	44

42. ábra: 3. varrat 1. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM3 delta ferrit 1) eredményei	44
43. ábra: 3. varrat 2. delta ferrit pontelemzésének (FH-WM3 delta ferrit 2) eredményei	45
44. ábra: Cr és Ni eloszlása a rétegekben és keveredési zónákban	46