



Simon Soma Csaba

**NSSC 2120-as sovány duplex acél hegesztett varratainak
vizsgálata**

Konzulens: Dr. Varbai Balázs

BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék



Budapest 2021.11.08.

Nyilatkozatok

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelményeknek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2021.11.08.

Konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Simon Soma Csaba (NNBV8W), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2021.11.08.

hallgató

Tartalomjegyzék

1. Összefoglalás	6
1.1 Summary	7
2. Bevezetés	8
2.1. A téma aktualitása	8
2.2. Szakirodalom áttekintése a korrózióálló acélokról	9
2.2.1. Ferrites korrózióálló acél	9
2.2.2. Martenzites korrózióálló acél	10
2.2.3. Ausztenites korrózióálló acélok	11
2.2.4. Duplex korrózióálló acélok	11
2.3 Szakirodalom áttekintése a duplex acélok hegesztésével kapcsolatban	13
2.4 Irodalmi áttekintés a korrózióálló acélok hajógyártásban betöltött szerepéről	14
3. Mérések és kísérletek	16
3.1 Hegesztés anyagai és eszközei	16
3.1.1 Alapanyagok	16
3.1.2 Hegesztő berendezések	18
3.1.3 Hegesztési paraméterek, hegesztés	20
3.1.4 A varratok jellemzői	21
3.2 A minták metallográfiai előkészítése	23
3.3. A minták laboratóriumi vizsgálata	24
3.3.1. Sztereomikroszkópos geometriai mérések	24
3.3.2 Varratok Formatényezőjének kiszámítása	27
3.3.3 Elektrokémiai maratás mikroszkópi képeinek kiértékelése	28
3.3.3.1. Elektrokémiai maratás menete	28
3.3.3.2 Mikroszkópi képek kiértékelése	29
3.3.3.3 Következtetések levonása a mikroszkópi képek alapján	33
3.3.4 Kémiai maratás menete és kiértékelése	33
3.3.5 Salétromsavas elektrokémiai maratás	38
3.3.5.1 Vizsgálat leírása	38
3.3.5.2 Mikroszkópi képek kiértékelése	38

3.3.6 Korróziós vizsgálat.....	40
3.3.6.1 Vizsgálat bemutatása.....	40
3.3.6.2 Vizsgálat eredménye és kiértékelése.....	41
4. Összefoglalás és eredmények kiértékelése.....	44
4.1 Eredmények összefoglalása.....	44
4.2 Eredmények kiértékelése, következtetések.....	45
5. Források, felhasznált irodalom.....	47

Előszó

Iskolás korom óta vonzott valamelyest a hajózás világa, melyet a régi korok impozáns és státusszimbólumnak minősülő vitorlásai szeretettek meg velem. Ez az érdeklődés azóta kiterjedt a hajózás minden formájára, legyen szó vitorlázásról, vagy akár a hatalmas tengeri civil vagy hadihajókról. Olyan célzattal érkeztem az egyetemre, hogy az itt elsajátított tudást a jövőben azon célomra használom fel, hogy valamilyen formában tengeri hajók tervezésében veszek részt. Azonban második egyetemi félévemben megtetszett az anyagtechnológia is, mely azóta is kísér, emiatt is választottam az Anyagtechnológia specializációját. Örömemre szolgált, hogy amikor konzulensem, Dr. Varbai Balázst megkerestem TDK-témával kapcsolatosan, akkor szóba került a dolgozatom témájaként szolgáló NSSC 2120-as acél, mely szó szerint ötvözi a számomra fontos két témát, a hajózást, és az anyagtechnológiát is. Ennek fényében készítettem az alábbi dolgozatot, melyet jelenlegi célom tovább vinni, és további méréseket, valamint vizsgálatokat végezni a témával kapcsolatosan.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Varbai Balázsnak a rengeteg segítséget, a mérésekben való aktív részvételt és támogatást, valamint a dolgozat írása közbeni folytonos és aktív kommunikációt, tanácsokat és segítséget.

Ezen kívül köszönöm az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésemre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget.

Külön köszönetet szeretnék intézni Simon Gergelyhez, a hegesztéskor nyújtott segítségéért, Dr. Kovács Dorinának a laboratóriumban elvégzett maratással kapcsolatos kérdésekben való segítségéhez, és Kuktáné László Ágnesnek a laborban felmerülő kérdéseimhez adott segítségért.

Köszönet illeti még ezen felül a Nippon Stainless Steel Corporation-t az alapanyag biztosításáért, valamint a Flexman Robotics Kft-t az ívhegesztő robot biztosításáért.

1. Összefoglalás

Napjainkban egyre fontosabb a fenntarthatóság, és ez nincs másképp a hajó és a tengeri berendezések gyártásában sem. A nemzetközi hajózásban rengeteg kihívás merül fel, nekünk mérnöki szemmel ezek közül kettő kifejezetten fontos a gazdasági és környezetvédelmi problémák.

A hajógyártásban tradicionálisan használt acélminőségek a 304L (X2CrNi18-9) és 316-os (X5CrNiMo17-12-2) ausztenites acélok. Azonban a hajók gyártásakor általában több különböző acéltípust is alkalmaznak. Rendszerint csak a tengervízzel közvetlenül érintkező részeit építik a hajóknak ausztenites korrózióálló acélból, a többi szerkezeti elemet pedig szerkezeti acélból. Tankerek esetében a tartályokat rendszerint duplex korrózióálló acélból készítik. Ez több problémát is okoz, egyrészt felületi kezelésre (bevonatolás, festés, korrózióálló réteg felvitele) van szükség, főleg azoknál az acéloknál, melyek nem korrózióállóak; másrészt jelentősen megnövekszik a hajók össztömege. Ezek mind gazdasági problémák, melyek vagy növelik az építés összköltségét, vagy lassítják a hajót, ezáltal drágítva annak üzemeltetését. Egy másik felmerülő probléma, hogy a hajó többet fogyaszt, ami mind gazdasági, mind környezetvédelmi probléma. A nemzetközi hajózásban használatos gigantikus hajók kétütemű, társasház méretű motorjai hatalmas mennyiségű károsanyagot termelnek és bocsátanak ki a környezetükbe. Egyes országok kereskedelmi hajóflottájának károsanyagkibocsátása akár 30 %-kal is több lehet [1], mint az ország személyautóflottájának kibocsátása.

Ezen problémákra lehet megoldás a duplex acélok használata a hajózásban, melynek acélminősége csökkenti a hajók össztömegét, miközben korrózióállósági és mechanikai tulajdonságaik változatlanok maradnak. Ezen szakterület egyik jelentős újítása az NSSC 2120-as sovány duplex acél, mely kifejezetten tengeri alkalmazásokra lett kifejlesztve, nagy hőbevitelű fedettívű hegesztés alkalmazása mellett, és a gyártó szerint a legmegfelelőbb lesz a feladatra.

A TDK-dolgozatom célja ezt az acélt megvizsgálni különféle módszerekkel, és ezen vizsgálatok eredményével verifikálni a gyártó állításait. A vizsgálatokhoz nagy hőbevitelű ívhegesztést hajtottam végre egy Yaskawa ívhegesztő robottal, két különféle huzallal, két különböző hegesztési beállításon. Ezt követően a varratokat daraboltam, majd mintákat készítettem a darabokból beágyazás, csiszolás és polírozás útján. Ezeket a mintákat végül különféle eljárásokkal vizsgáltam. Ilyen eljárás volt például egy ASTM A 1084 szabvány (Standard Test Method for Detecting Detrimental Phases in Lean Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels) által előírt oxálsavas elektrokémiai maratás, mely a lehetséges vegyületfázisok kialakulását (a fázishatárok „vastagodásaként”) és nitridkiválásokat mutatja ki; vagy egy másik, ugyanilyen funkcióval bíró salétromsavas elektrokémiai maratás. Elvégeztem ezen felül egy módosított Beraha marószerezettel végzett kémiai maratást, mely a fázisarány kimutatására, valamint az alapanyag hegeszthetőségének vizsgálatára irányult. Végül, de nem utolsósorban, a mintákat egy korróziós vizsgálatnak vettem alá, mely tömegvesztéséből számolja a minták elfogadhatóságát. Ezt a vizsgálatot is az ASTM A 1084-es szabvány alapján végeztem el. Eredményeimet és végkövetkeztetéseimet a vizsgálatok során készített mikroszkópi képek aprólékos elemzése után fogalmaztam meg.

1.1 Summary

Sustainability is increasingly important nowadays, and it is no different for the manufacturing of shipping vessels and maritime equipment. Engineers are challenged by many issues surrounding international shipping, such as economic and environmental problems.

The traditionally used steel grades in shipbuilding are the 304L (X2CrNi18-9) and 316 (X5CrNiMo17-12-2) austenitic steels. However, we usually combine different steel grades during the shipbuilding process. We usually only build those parts of the ship from austenitic stainless steels that are directly in contact with sea water, other structural parts of the ship might be built from structural steels. However, the containers of tankers are usually built from duplex stainless steel. Mixing materials like this causes a lot of problems, such as the need for surface treatment (such as coating, painting or the application of corrosion resistant layers), especially with steels that are not stainless. Another problem is the greatly increased weight of the ships that are built from different steel grades. These difficulties cause economic and environmental problems as well, as they increase the total cost of construction on the one hand and reduce the speed of ships on the other. Another downside is fuel consumption, which is both an environmental and an economic issue, as the gigantic vessels used in international shipping have two-stroke engines the size of apartment buildings producing and emitting large amounts of pollutants into the environment. In certain countries, the shipping fleet emits 30% more pollutants, than all passenger cars in that country [1].

A solution for these problems could be the usage of duplex stainless steels in the production of ships, as this steel grade reduces the total weight of ships, while corrosion resistance and mechanical features are not affected negatively. The latest development in the area is the introduction of the NSSC 2120 lean duplex stainless steel, which is the best of its kind for its usage according to the manufacturer, as it is developed particularly for maritime applications and high heat input submerged arc welding.

The purpose of this study is to examine this steel grade with different methods, and to evaluate the results of these methods. First of all, I used a Yaskawa arc welding robot to apply a high heat input arc welding on the material, using two different electrodes as well as two different welding settings. After the welding, I comminuted the welds, and sampled them through bedding, grinding and polishing. I then examined the samples with different testing methods, such as nitride separation and the oxalic-acid electrochemical etching prescribed by the ASTM A1084 standard (Standard Test Method for Detecting Detrimental Phases in Lean Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels). I also performed another electrochemical etching, using nitric acid. I followed up with a modified Beraha chemical etching, used to determine the proportion of phases, and to examine the weldability of the raw material. Last but not least I conducted a corrosion test, also prescribed by the ASTM A1084 standard. I formulated my findings and conclusions after carefully inspecting the microscope images I obtained throughout the process.

2. Bevezetés

2.1 A téma aktualitása

Az emberiség a kezdetek óta használ különböző fémeket célfeladatokra. Ezek kezdetben még a könnyen bányászható, könnyen olvasható és önthető fémek voltak mint amilyen a réz és a vas. Azonban az idő előrehaladtával egyre inkább az adott feladatra, felhasználásra a legmegfelelőbb fém, ötvözetet kezdte el használni az ember. Így került kifejlesztésre az acél, melyet az emberiség évszázadok óta alkalmaz. Az acél a legtöbbet használt ötvözet a Földön. Ezt a széleskörű felhasználást az előnyös tulajdonságai, és nagy mértékben történő ötvözhetősége magyarázza, ugyanis ezen ötvözetekkel a legtöbb szükséges felhasználáshoz legoptimálisabb tulajdonságok érhetők el.

Az acél egy kis szénttartalmú vasötvözet, legfeljebb 2,1 % szénttartalommal bír. Az acélgyártás során több gyártási módszerrel is elérhető a jóminőségű, szennyező mentes acél készítése. Ez az anyag azért kifejezetten fontos, mert az összes lehetséges felhasználási célra tökéletesen megfelel, legyen az építészet, közlekedés, járműipar, esetleg háztartási cikkek gyártása. Azonban nem minden acéltípus felel meg minden feladatnak, vannak speciális acéltípusok, melyek egy-egy célfeladatra vannak kifejlesztve, olyan ötvöző fémekkel ötvözve az acélt, amelyek segítségével ezt a célfeladatot a lehető legjobban teljesíteni tudja. Ilyen speciális alkalmazásra fejlesztett acéltípusok például a gyorsacélok, melyek gyorsan forgó általában más fémeket megmunkáló gépek adott, nagy keménységet igénylő alkatrészeinek alapanyagai. Vagy például a hőálló acélok, melyek kifejezetten nagy hőmérsékleten üzemelő alkatrészek, berendezések alapanyagai, ezen környezeteket ötvözőik segítségével képesek kibírni. Az általam vizsgált acél is egy ilyen acélcsoportba tartozik, mégpedig a korrózióálló acélok csoportjába, melyeket a következőkben részletesebben bemutatok, valamint jellemzek.



1. ábra New York-i felhőkarcoló acélszerkezetén dolgozó munkások [2]

Ez a téma személyes választásom is volt, mivel jövőbeli terveimben szerepel hajótervezéssel foglalkozni. A napjainkban használt hajók nagy része valamilyen minőségű és fajtájú korrózióálló acélból készült, jelenleg főleg ausztenites korrózióálló acélokból. Azonban kibontakozóban van egy új irányvonal, mely duplex acélokat alkalmaz hajóépítéshez, felhasználva ezen acéltípus jó korrózióállóságát és mechanikai tulajdonságait. [3] Így nyert számomra is aktualitást a téma, hisz ezeket az acélokat jövőbeli tanulmányaim és valószínűleg munkásságom folyamán ismernem és használnom kell.

2.2 Szakirodalom áttekintése a korrózióálló acélokról

A rozsdamentes acélok, melyeken belül megkülönböztethetők a korrózióálló, kúszásálló vagy hőálló acélok egy széles körben felhasznált acélcsoport. Én ebben a dolgozatban a korrózióálló acélokkal foglalkozok. Fontosságukat, és széleskörű használatuk okát a nevük is mutatja, ezek az acélok korrózióállóak, ami azt jelenti, hogy a különféle korrodáló közegeknek ellen tudnak állni, ennek következtében felhasználhatjuk gyengébben korrozív közegek esetén, például az élelmiszeriparban, vagy épületek, gyárak vízvezetékeihez. De adott összetételben akár savtároló tartályok, tankerhajók tartályai is készülhetnek belőle. Korrózióálló acélok öt fő csoportja különböztethető meg, a jellemző szövetszerkezetük szerint. Ezek a ferrites korrózióálló acélok, az ausztenites korrózióálló acélok, a martenzites és kiválasosan keményíthető korrózióálló acélok, valamint a duplex korrózióálló acélok. Ezen acélcsoportokban mind a következő fő ötvözők találhatóak: króm, nikkel, molibdén, mangán stb. Ezen ötvözők arányának függvényében sorolható be az adott acél az előbb említett öt fő csoportba. A következőkben rövid leírás található az egyes korrózióálló acélokról.

2.2.1. Ferrites korrózióálló acél

A ferrites korrózióálló acélok akár 10-30 % krómot is tartalmazhatnak. Ezen felül gyakori ötvözője még ennek a csoportnak a molibdén, és ötvözik még titánnal, nióbbiummal, valamint nikkellel. Ezek az acélok jelentősen fokozott ellenállást mutatnak a lyukkorrózióval szemben. Térben középpontos köbös kristályráccsal rendelkeznek, és hajlamosak szemcsedurvulásra, melyet az okoz, hogy a lehűlés során nem esnek át allotróp átalakuláson. Éppen ezért ridegtörésre hajlamos acél fajta. Használják őket kopásnak kitett területeken, valamint például kipufogócsövek gyártásához. Ha ezen acéltípus krómtartalmát és molibdéntartalmát jelentősen megnöveljük (molibdén esetén akár 4,5 % krómnál 30 %), akkor kapjuk a szuperferrites korrózióálló acélokat. Ezen acélok szupersége a jelentős korrózióállóságukkal függ össze. Gyakran alkalmazzák az építőiparban, korlátok, burkolatok készítéséhez. Ezen felül még használják csővezetékek, ipari berendezések gyártásához, a járműiparban, konyhai eszközök és háztartási eszközök esetén. Ajánlott olyan területen alkalmazni, ahol a közeg klór, vagy más halogén elemeknek van kitéve, ugyanis ez az acéltípus különlegesen jól ellenállnak az említett környezeteknek. Ráadásul gazdaságos is ezen acélok alkalmazása, az alacsony, vagy egyáltalán nem létező nikkel tartalmuk miatt. [4]



2. ábra Ferrites korrózióálló acél használata motorkerékpár alkatrészeihez [5]

2.2.2. Martenzites korrózióálló acél

Ezen acélokat különleges alkalmazásokhoz használják fel, ezt mutatja az is, hogy az európai szabvány 25 különböző martenzites acélt különböztet meg egymástól. Ez az acélfajta maximum 1,2 % szén tartalmaz, azonban jelentős króm (akár 13-19 % króm), valamint esetenként nikkel, molibdén vagy vanádium ötvöztetést. Különlegessége az ilyen acéloknak az, hogy a megfelelő (nem akkora, mint a ferritesé) korrózióállósága mellett rendkívül jó szilárdsági és kopásállósági tulajdonságokkal rendelkeznek. Általában nemesített állapotban alkalmazzák őket, levegőn is edzhetők. 350-550 °C fokon kiválóan keményíthető, ezt a keményedést a finom karbidképződés eredményezi. Ezen acélok egyes ötvözeteire Japánban triplex acélként hivatkoznak. Golyóscsapágyak, háztartási eszközök, kések (háztartási és ipari egyaránt) esetén alkalmazzák, valamint sebészeti, orvosi eszközök készítéséhez. Gázturbinák alkalmazási körében is gyakori anyaga az alkatrészeknek. [4]



3. ábra Martenzites korrózióálló acélból készült orvosi és sebészeti eszközök [6]

2.2.3. Ausztenites korrózióálló acélok.

Ez az acélcsoport a legnagyobb alosztálya a korrózióálló acélok családjának. 54 acéltípust különböztetnek meg az ausztenites acélok között, ezek között vannak igen gyakori, széles körben használatos típusok, és vannak nagyon specifikus feladatra felhasználtak. Általában melegalakításukat követően gyors hűtés következik, amely egy edzéssel ekvivalens, viszont a γ -vas nem alakul át martenzitté. Az előbb említett hőkezelés elnevezése az ausztenites lágyítás. Felületen középpontos köbös kristályráccsal rendelkező anyagról beszélünk, amely nagy szívósságot biztosít gyenge szilárdsági tulajdonságok árán. Hidegalakításkor viszont jelentős keményedésen megy keresztül ez az acéltípus, mivel az alakítás során az ausztenit egy része martenzitté alakul. Ezek az acélok többféle korróziós hatásnak is ellen tudnak állni a megfelelő ötvözet alkalmazásával. Ezek a teljesség igénye nélkül nedves- vagy szárazkorróziós hatások is lehetnek. Azonban kifejezetten veszélyes a kristályközi- és feszültségi korrózió jelensége ezen acélfajtára. Ezen acélokat felhasználják vegyiparban, konyhai eszközökhöz, implantátumokként, uszodai berendezések, atomerőművi berendezéseként, valamint vákuumtechnikai berendezéseként. Ezen felül alkalmazzák még építészeti célokra, és csőszerelvények gyakorta használt anyaga is. [4]

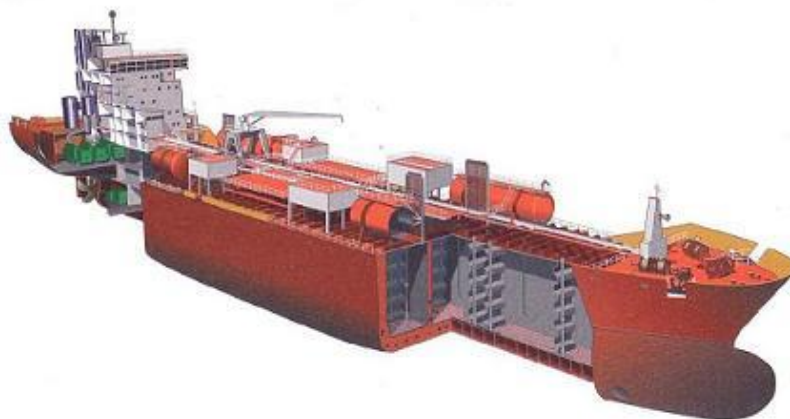


4. ábra Ausztenites korrózióálló acélból készült szobor Chicagóban [7]

2.2.4. Duplex korrózióálló acélok

Ezek az acélok nagyjából azonos mennyiségű ausztenitet és ferritet (általában 40-60 % δ -ferritet) tartalmaznak. Fontos csoportja az acéloknak, egy új, napjainkban is fejlődő irányzatát képezi a korrózióálló acéloknak. A mai napig fejlesztenek ki újabb és újabb duplex acélokat. Jelenleg 16 szabványosított típusa van. A nikkel londoni fémtőzsdén való árának kiszámíthatatlansága miatt volt fontos ezen acélok fejlesztése, mivel ezen acélok nikkelből és molibdénből keveset tartalmaznak, így kiszámítható marad az acél ára. Kiemelkedő ellenállással rendelkeznek lyuk-, rés- és feszültségi korrózióval szemben, így azon területeken, ahol ezek a korróziós fajták fellépnek gyakorta használt anyag. Ráadásul klórtartalom és hőmérséklet függvényében is jóval nagyobb tartományban használhatóak biztonságosan, mint ausztenites rokonaik, akár 75 °C-nál nagyobb hőmérsékleten és közel 1 %-os klórkoncentráció

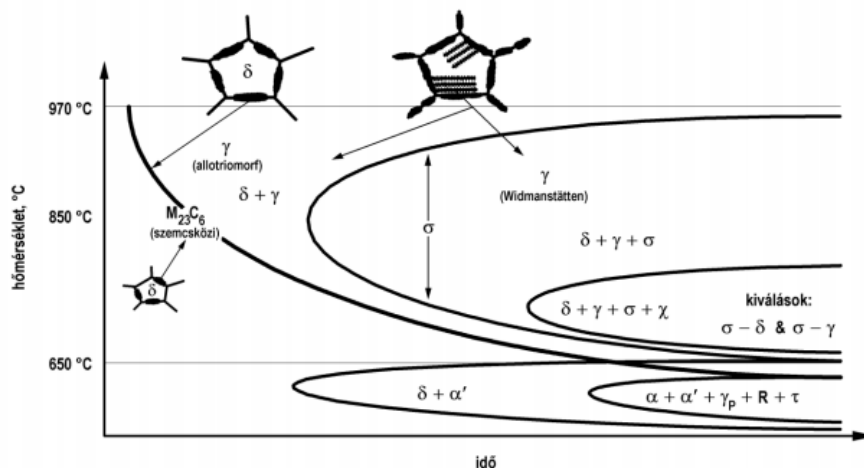
mellett. További előnyük az ausztenites acélokkal szemben az, hogy nagy szilárdsággal rendelkeznek. Míg egy lágyított ausztenites korrózióálló acél folyáshatára maximum 300 MPa, addig egy duplex acélé 400-700 MPa-os régióban van lágyított állapotban. Ez által kisebb falvastagságú csöveket, könnyebb szerkezeteket lehet létrehozni duplex acélokból, mint ausztenitesből. Ezzel anyagot is spórolhatnak a gyártók, költséget is csökkenthetnek, ráadásul adott alkalmazásoknál további előnnyel járhat. Például tengerjáró hajóknál csökken a hajó súlya, ezáltal gyorsabban tud közlekedni, és üzemanyagból is kevesebbet fogyaszt, így sokkal jobb hatásfokkal és gazdaságosabban üzemeltethetők a duplex acélból készült hajók. Azonban sajnos ezen acélok felhasználása mindössze pár százalékot tesz ki a teljes felhasznált korrózióálló acélokból. Ennek oka az, hogy megmunkálásuk rendre új technológiát jelent (ezzel átállásra, például új gépek beszerzésére kényszerítve a gyártókat), melynek összes pozitív, illetve negatív tulajdonsága még nincs teljes mértékben kitapasztalva, illetve mérésekkel bizonyítva. Azonban a jövőben mindenképp előnyös lesz ezen acélok használata, a nem jelentős nikkelötvöztetésük miatt, így az úgynevezett sovány duplex acélok egyre több teret nyernek. Összességében elmondható, hogy azért várható igen széleskörű használata ennek a fajtának, mivel egyszerre rendelkezik a ferrites és ausztenites rokonai leghasznosabb és legjobb tulajdonságaival. Gyakorta használják tengervízzel érintkező gépek, alkatrészek gyártására (hajók, olajfűró tornyok, mélytengeri csővezetékek, kábelek, valamint tengervízet keringtető csövekhez, a ferrit kloriddal szembeni ellenállása miatt), és vegyipari használata is jelentős. Itt érdemes megemlíteni, hogy a nikkel- és molibdénszegény sovány duplex acélok korrózióállósága is jobb a konkurens terméknek tekinthető ausztenites acélokénál nem csak a mechanikai tulajdonságaik. Ezen felül alig változik ezen acélok ára a fémtőzsdei 'árfolyamingadozásra'. Az ilyen sovány duplex acélok egyik jövőbeli zászlóshajója lehet majd az általam is vizsgált NSSC 2120-as japán sovány duplex acél. Ez egy kifejezetten új ötvözet, melyet a 2010-es évek óta fejlesztenek, így a legtöbb szabványtípusban még nem is szerepel. [4]



5. ábra Vegyianyag-szállító hajó metszeti képe, melyen láthatóak a duplex acélból készült tartályfalak [8]

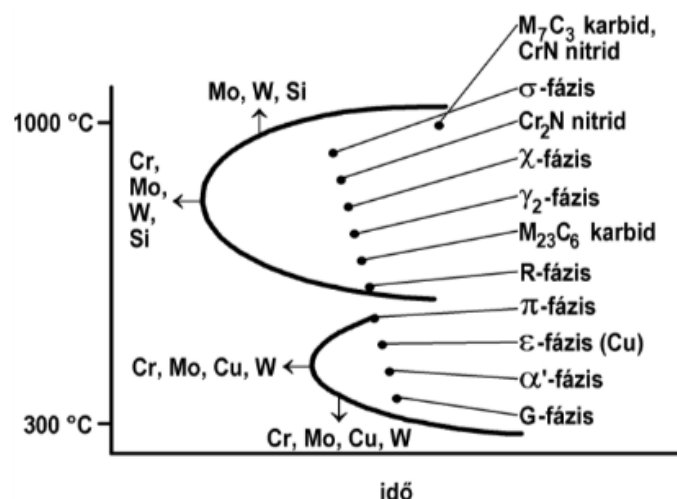
2.3 Szakirodalom áttekintése a duplex acélok hegesztésével kapcsolatban

A korrózióállóacélok felhasználási területéből következőleg (például csővezetékek, hajótestek, kültéri szerkezetek) gyakorta alkalmazzák a hegesztést, ha megmunkálni kívánják ezt az acélminőséget. Azonban mivel sokszor ezek az alkatrészek/berendezések/járművek, amelyeket duplex acélból gyártanak jelentős méreteket öltenek, így nagy hőbevitelű hegesztésre van szükség ahhoz, hogy termelékenység megfelelő legyen. Ez azonban mellékhatásokkal jár, nagy hőbevitelű hegesztés esetén intermetallikus fázisok (összefoglalva a 6. ábrán) válhatnak ki a duplex acél szemcséhatárai mentén, és a szemcséken belül is, ezzel rontva az acél mechanikai, korrózióálló tulajdonságait.



6. ábra TTT-diagram duplex acélra vonatkozóan izotermikus hűtést követően [9]

Különböző összetételekkel rendelkező duplex acéloknak, különböző hőmérsékleten más és más keletkező fázis/fázisok jellemzőek. Fontos kiemelni, hogy a duplex acéloknak lévő ötvözők ezeket a fázisgörbéket balra tolják, így akár lassabb hűtés esetén is megjelenhetnek a káros fázisok a szövetszerkezetben. Ezeket az alábbi ábrával lehet szemléltetni:



7. ábra Duplex acéloknak jellemző és lehetséges kiválások [10]

A következőkben jellemzem az egyes fázisokat, valamint leírom milyen hatással vannak a korrózióálló acéloknak. Nagymértékű Cr-ötvöztetés esetén a korrózióálló acéloknál jellemző a σ-

fázis. A Cr-tartalommal nő a kiválásának valószínűsége, szuperduplexeknél a legjellemzőbb. Általában Fe-Cr(-Mo) szerkezetben írandó fel általában, nagyjából 600-1000 °C hőmérsékleten válik ki. Gyakori fázis még a χ -fázis, mely 700-850 °C-on válik ki, és ez is a Fe-Cr-Mo képlettel írható fel. Ferrites szemcsék határán és a szemcsén belül is létrejöhetnek a króm-nitrid (Cr_2N) kiválások, melyek a nagy (kb 70 %-os) krómtartalmuk miatt környezetükben Cr-elszegényedést okoznak. Ezeket a kiválásokat főként a duplex acélok hegesztési hőhatásövezetében (ezentúl HAZ) találhatjuk meg, az itt kialakuló jelentős ferrittartalom miatt. Erősen ridegítő hatású, 550-650 °C-on válik ki az úgynevezett R-fázis, ami egy Mo dús (Fe_2Mo) fázis. Ezek a jellemzően nagy hőmérsékletű kiválások, melyekkel mi a nagy hőbevitelű hegesztéskor találkozhatunk. Tekintsük át a többi keletkező fázist is. Kisebb hőmérsékleten duplex acéloknál előfordulhatnak az erősen ridegítő hatású π -nitridek is, melyek jellemzően 550-600 °C-on válnak ki. A szintén nitrid ε -bázis főleg a rézzel ötvözött duplex acélokra jellemző. A G-fázis egy Ni-Ti-Si vegyületfázis, mely ritka a duplex acéloknál. Relatív kis hőmérsékleten a legnagyobb jelentőséggel az α' -fázis rendelkezik, (475 °C-os elridegedés). Itt egy $\alpha \rightarrow \alpha'$ reakció szerinti bomlási folyamatról beszélünk, mely krómban dús ferrites zónákat hoz létre. A réz, szilícium, valamint a karbidképző ötvözők csökkentik a kiválások hőmérsékletét, valamint inkubációs idejét. Ezen fázisok ismerete szükséges a későbbiekben elvégzett mérések kiértékeléséhez. [10]

Az általam vizsgált NSSC 2120-as acél sajátossága a gyártó szerint, hogy nagy hőbevitelű hegesztésnél nem jönnek létre az acél tulajdonságait negatívan befolyásoló fázisok. A következőkben elvégzendő vizsgálataimmal ezt próbálom alátámasztani.

2.4. Irodalmi áttekintés a korrózióálló acélok hajógyártásban betöltött szerepéről

Az utóbbi években, évtizedben egyre fontosabbá vált a nemzetközi hajózásban a környezettudatosság, a hajógyártásban felhasznált alapanyagok lehető legfentarthatóbb előállítás, és a költségek csökkentése. Ezen feladatok megoldását célozták meg a hajógyárak és megrendelők abban a formában, hogy duplex acélokat kezdtek alkalmazni a hajógyártásban. Ezen acélok sokkal jobb korrózióálló tulajdonságokkal, és felettébb jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek ausztenites társaikhoz képest, így a hajógyártáskor a felhasználandó alapanyag mennyisége csökken, ezzel tudatosabban is viselkedve a természeti erőforrásokkal, és a költséghatékonyságot is szem előtt tartva. Ezen felül meg kell említenem, hogy a duplex acélok használatával a hajók össztömege is csökken ugyebár a felhasznált alapanyag csökkenésével arányosan, ezzel egyrészt több árut is tudnak szállítani, másrészt gyorsabban közlekedhetnek a vizeken, és üzemanyagból is kevesebbet fogyasztanak, ezekkel összességében mind környezetvédelmi mind gazdasági minőségben javítva a nemzetközi hajózást. Azonban, mielőtt ezen acélok hajózásban történő használatára bővebben kitérnénk, ki kell emelnem, hogy a jellemzően korrózióálló acélokat felhasználó hajótípusok (tankerek, vegyianyag szállító hajók) tervezésekor és gyártásakor egy sor szabályozásnak és kitételnek kell megfelelni. Ezen szabályozásokat és kitételeket a Nemzetközi Tengerészeti Szervezet (International Maritime Organization, röviden IMO) szabja és határozza meg. A szabályozások magukba foglalják a biztonságos navigációt, a levegőszennyezést, de például a hajó által szállított folyékony, szilárd vagy gázemű szállítmányok lerakódását is. Ezek függvényében tervezik meg a hajókat, melyek a leginkább a fedélzetükön futó csőrendszerekről ismerhetők

fel és különböztethetők meg a többi hajótípustól. Egy átlagos méretű tanker vagy vegyianyagszállító hajó gyártásához nagyjából 1500 tonna korrózióálló acél szükséges.



8. ábra Korrózióálló acélból készült tankerhajó tartály belseje [11]

A korai vegyianyagszállítók 304L típusú korrózióálló acélból készültek, és míg manapság előfordul a 316-os ausztenites korrózióálló acél is a palettában, mégis a leggyakrabban a 2205-ös duplex korrózióálló acélt alkalmazzák. Mégpedig amiatt, mert jobb korróziós tulajdonságai és mechanikai tulajdonságai vannak a 316-os ausztenites acélnál, ezzel csökkentve a hajók tömegét. Ezen felül a jobb korróziós tulajdonságoknak (részben a 3 %-nyi molibdén tartalomnak) köszönhetően sokkal többféle erősen korrozív vegyi anyag szállítására válik képessé az adott hajó. Ezen felül hasonló hőtágulása van ennek a duplex acélnak a hajótörzsüket általában képző acélokéhoz. [11] Az első vegyianyagszállító hajó, mely duplex acélból épült a Sunrise Hope nevű hajó volt, melyet az Usaki hajógyár épített a Nippon Tengerészeti cég számára, mely üzemeltetni fogja. Ez egy kifejezetten nagy hajó, a maga 12500 metrikus tonna tömegével és 14 tároló tartályával. A hajót 2014-ben fejezték be és bocsátották vízre. [12]



9. ábra A Sunrise Hope nevű hajó [12]

A svéd Sandvik vállalat is bejelentette, hogy a saját gyártású Sandvik SAF 2507 szuper duplex acéljukat választották a Project P16 Prototype nevű 56 lábas prototípus hajójuk gyártásához. Ez a projekt az első, mely a hajó egészét duplex acélból készíti, ezzel még könnyebbé válik a hajó. A cég azt is kiemelte pozitívumként, hogy a hajót a későbbiekben nem kell takarítani majd, és a tengeri állatok számára káros, sőt olykor mérgező korrózióálló festékekkel se kell lekenni a hajótestet, ugyanis az acél ezek nélkül is megfelelő ellenállóságot mutat a tengervízhez, azaz az erősen korrodáló kloridos közegekhez. A hajót a partiőrség, valamint vízimentő egységek számára fejlesztik, de elérhető lesz polgári használatra is a későbbiekben a gyártó szerint. [13] Végül de nem utolsó sorban meg szeretném említeni, hogy az általam vizsgált NSSC 2120-as acél is egyre inkább reális opcióvá válik a hajógyártásban, amely szférába a gyártó szánja ezt a típust. Ez az acéltípus lett kiválasztva Japánban két tanker gyártására. Ez azért érdekes, ugyanis ezt az acéltípust a szakértők egy a 4304-es típus alternatívájának gondolják, melyből jelenleg a legtöbb tankerhajó készül. Ezen acél tulajdonságait a későbbiekben tárgyalom.[14]

3. Mérések és kísérletek

3.1 Hegesztés anyagai és eszközei

A következőkben a hegesztés során alkalmazott alapanyagokat és berendezéseket, valamint a hegesztés menetét mutatom be.

3.1.1 Alapanyagok

A kísérleteink során az alapanyagunk maga az NSSC 2120-as duplex korrózióálló acél volt. Ez egy új ötvözet típus, a 2010-es években fejlesztette ki a Nippon Steel acélgyártó cég, kifejezetten tengeri eszközök (hajók, olajfűrók, tengervízzel érintkező berendezések) gyártására. Szabványszámot 2019-ben kapott. Szabvány jelölése UNS S82122. Összetételét a következő táblázat tartalmazza:

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0,019	0,38	3,0	0,024	0,001	2,03	20,9	0,28	1,08	0,18

1. táblázat Az NSSC 2120-as acél összetétele (%-ban)

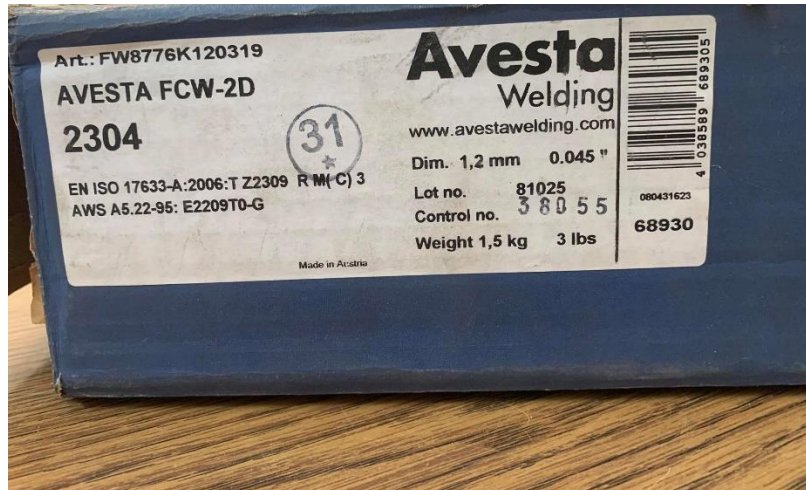
Jellemző mechanikai tulajdonságai a következők: egy 20 mm vastag NSSC 2120-as lemez szakítószilárdsága 700 MPa, míg az egyezményes folyáshatára nagyjából 500 MPa. [15] A mi általunk hegesztett lemez vastagsága 10 mm. Előkészítésként daraboltuk, valamint acetonos zsírtalanító tisztítást végeztünk rajta. Mivel az acél pácolt, így a felszíne passzivált állapotban van, mattos hatású. A másik alapanyagunk a huzal, melyet a hegesztéshez használtunk. Két féle huzalt alkalmaztunk, ezeket is jellemzem a következőkben. Az első huzalunk egy 2209-es tömör duplex huzal volt, 1,2 mm-es átmérővel.



10. ábra 2209-es tömör duplex huzal

Ennek a huzalnak a jelölése a következő: G 22 9 3 N L, mely jelölésben a G azt jelöli, hogy tömör huzal, a 22 a krómtartalmat mutatja százalékosan (22 % Cr), a 9 a nikkeltartalmat, míg a 3 a molibdén tartalmat mutatja. Az N azt jelenti, hogy tartalmaz a huzal nitrogént, míg az L a csökkentett széntartalomra utal. Szabványszáma MSZ EN ISO 14343-A, melyben az A az európai szabványos megnevezés (USA-ban B lenne).

A másik huzal, melyet alkalmaztunk egy 2304-es töltött huzal, úgyszintén 1,2 mm-es átmérővel.



11. ábra 2304-es töltött huzal

Ennek a huzalnak a szabványszáma MSZ EN ISO 17633-A, és jelölése T Z 23 09 R M(C) 3, ahol a T arra utal, hogy töltött, a Z arra, hogy egyéb típus, a 23 a krómtartalmát mutatja százalékosan (23 % Cr), míg a 9 a nikkeltartalmát. Az R a rutilos töltetre utal, az M(C) azt jelöli, hogy kevert (mixed) gáz vagy szén-dioxid is alkalmazható a hegesztéshez, a 3 a hegesztési pozíciót (Pa és PB) jelöli.

Fontos alapanyaga a hegesztésnek még a gáz, melyet használtunk. Ez egy Cronigon 2-es gáz volt, melynek szabványa a következő: MSZ EN ISO 14175-M12-ArC-2,5. Az M12 azt jelenti, hogy kevert gáz (mixed), és hogy az aktív komponens 0-5 %. Az ArC az összetételét jelöli,

mely Argon + CO₂, egész pontosan 2,5% CO₂, amit a szabvány végén lévő 2,5 jelöl. A gáznál még meg kell említeni a gázáramlás sebességét, mint tényezőt, de ezt majd az egyes hegesztéseknél írom le, mint hegesztési paraméter.



12. ábra hegesztéshez használt Cronigon gáztartályok

3.1.2 Hegesztő berendezések

A következőkben a hegesztéskor alkalmazott berendezéseket mutatom be és jellemzem. Három fontos berendezést emelek ki, az áramforrást, a vezérlést, valamint a hegesztő robotot, amellyel dolgoztunk. Azért döntöttünk a robottal való hegesztés mellett, mivel nagy hőbevitelűhegesztést vizsgálunk, melyet sokkal könnyebben és pontosabban elvégezhetünk a robot segítségével, mint szabadkézzel, ráadásul biztonságosabb is az eljárás.



13. ábra Yaskawa robotvezérlés

Vezérlésként egy Yaskawa ERAS-1000-06VXH25-E10 típusú robotvezérlést használtunk, melynek további specifikációi az alábbi képen szerepelnek:



14. ábra Yaskawa robotvezérlés specifikációi

Áramforrásunk egy Fronius TPS 400i Pulse típusú áramforrás volt, mely több száz különböző anyag különböző fajta hegesztésének beállítására képes. Mi ebből az ausztenites acélokra való beállításokat alkalmaztuk, mivel kifejezetten duplex acélokra nem volt beállítás, és a rendelkezésünkre álló beállítások közül ez állt legközelebb az ideálishoz. Maga a berendezés, és a specifikációi az alábbi képeken láthatóak:



15. ábra Fronius TPS 400i Pulse áramforrás és specifikációi

Végül, de nem utolsó sorban pedig maga a hegesztő robot, amellyel dolgoztunk. Egy Yaskawa robottal hegesztettünk, mely Motoman AR1440-es robotkarral, és Yaskawa YRC1000-es vezérléssel rendelkezik.



16. ábra Yaskawa hegesztő robot, BME G épület

Megemlítendő, hogy a robot teherbírása 12 kg, munkatartománya horizontálisan 340°-os egy 1440 mm-es köríven, míg vertikálisan is kifejezetten kis méretű 'vakfoltja' van, nagy teret fed le. A robot tömege 150 kg, vezérlésének tömege 70 kg. AC szervomotorok biztosítják a megfelelő mozgását a karoknak, melyek segítségével összesen 8 vezérelhető tengelye van. Programozható lépéseinek száma 200000, míg akár 10000 utasítást is tud kezelni. Az áramforrásnak 400 A a maximális hegesztési áramerőssége.

3.1.3 Hegesztési paraméterek, hegesztés

A következőkben a végső hegesztési varratokat mutatom be, valamint az ezekhez tartozó paramétereket, eljárási módokat. Négy hegesztést végeztünk, kettőt a 2209-es tömör duplex huzallal, és kettőt a 2304-es töltött huzallal. Ezen varratok szerepelnek az alábbi képen a következő sorrendben balról jobbra: 1.: PMC Univ. tömör huzallal; 2.: PMC PCS tömör huzallal; 3.: PMC Univ. töltött huzallal; 4.: PMC PCS töltött huzallal.



17. ábra Hegesztett varratok

Az 1-es számú varratot a 2209-es tömör duplex huzallal hegesztettük, 394 A áramerősségen, 29,0 V-os feszültséggel. A huzalelőtolási-sebességünk 17,4 m/min volt, a gázunk térfogatárama pedig 17 liter/min. Fontos paraméter az, hogy PMC Universal beállítást alkalmaztunk. A PMC a *Pulse Multi Control* rövidítése. Látható, ahogy a varrat végén 'elkenődött' a varrat, ez megfigyelhető a későbbiekben a többi varrat esetében is. Ezeket a részeket a későbbi vizsgálatoknál nem vettük figyelembe a lehetséges kiugró, vagy esetleges valótlan értékek elkerülése érdekében.

A 2-es számú varratnál ismét a tömör huzalt alkalmaztuk, azonban itt több paraméter is változott. Hiába maradt a gázunk térfogatárama 17 liter/min, az áramerősség már 401 A volt, a feszültség 28,5 V-ra csökkent. 17,2 m/min huzalelőtolási-sebességet alkalmaztunk. Itt azonban PMC PCS eljárással dolgoztunk, ahol a PCS a *Pulse Controlled Spray* rövidítése.

A 3-as számú varratnál már a 2304-es töltött huzalt alkalmaztuk, ez látható (hiába takarítottuk le a varratot) a visszamaradt salakdarabokon a varrat felületén is, valamint abból is, hogy ezen varratok felülete fényes. Itt is PMC Universal eljárással dolgoztunk, 369 A-es áramerősséggel, 30,4 V-os feszültséggel. A huzalelőtolási-sebesség 18,0 m/min, a gáz térfogatárama pedig az eddigi 17 liter/perc.

A 4-es számú, egyben utolsó varratnál a töltött huzalt alkalmaztuk PMC PCS eljárás keretein belül. Itt 399 A volt az áramerősség, 29,3 V a feszültség. A gáz térfogatárama 17 liter/perc volt, a huzalelőtolási-sebessége pedig 17,6 m/min. Ezen a varraton is jól látható a töltött huzalra jellemző megmaradt salak darabok, és az ezek eltávolítása után maradt fényes felülete a varratnak.

Eljárás	PMC Univ tömör	PMC PCS tömör	PMC Univ. töltött	PMC PCS töltött
Villamosparaméterek	394 A	401 A	369 A	399 A
Hőbevitel	3,05 kJ/mm	3,05 kJ/mm	2,99 kJ/mm	3,12 kJ/mm

2. táblázat hegesztési áramerősség és hőbevitel a különféle eljárásoknál

A hőbevitelt a következő képlettel számítottam:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3}$$

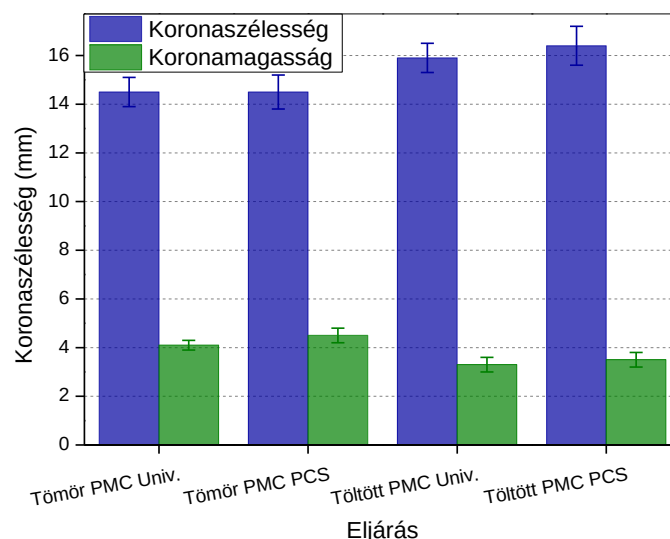
3.1.4 A varratok jellemzői

Ebben a fejezetben a varratok általam tolómérővel, és ferritszkóppal megmérhető tulajdonságait foglalom össze táblázatos, és diagramos formában.

Először a varratok kézzel mérhető méreteit vizsgáltam, melyek a koronaszélesség, illetve a koronavastagság voltak. Ezeket lehetséges volt tolómérővel mérni (érdekes lesz a későbbiekben látni, hogy a sztereó mikroszkóppal készített képeken való digitális méretezés mennyire egyezik vagy épp nem egyezik meg a kézzel mért értékekkel), ezeket az értékeket az alábbi táblázatban rögzítettem:

	PMC Univ. tömör huzal		PMC PCS tömör huzal		PMC Univ. töltött huzal		PMC PCS töltött huzal	
	Kor.szél.	Kor. mag.	Kor.szél.	Kor. mag.	Kor.szél.	Kor. mag.	Kor.szél.	Kor. mag.
1	14,7	4,2	15,3	5	17,1	3,6	17,6	3,9
2	14,1	4,3	15,7	4,6	16,7	3,3	17,0	3,8
3	14,1	4,1	15,1	4,6	15,8	3,5	17,3	3,6
4	14,2	4,1	14,7	4,5	15,9	3,6	17,0	3,6
5	15,1	3,7	14,4	4,7	15,9	3,7	16,7	3,5
6	13,7	4,1	13,9	4,5	15,2	3,4	16,4	3,3
7	13,8	4,4	13,6	4,7	15,6	3,2	16,1	3,3
8	15,0	3,8	14,4	4,7	16,0	3,0	15,1	3,3
9	15,3	4,1	14,2	4,3	15,4	3,0	15,8	3,1
10	14,6	3,9	13,4	4,1	15,4	2,9	15,3	3,1
Átlag	14,5	4,1	14,5	4,5	15,9	3,3	16,4	3,5
Szórás	0,6	0,2	0,7	0,3	0,6	0,3	0,8	0,3

3. táblázat A négy minta varratának kézzel mérhető fizikai tulajdonságai



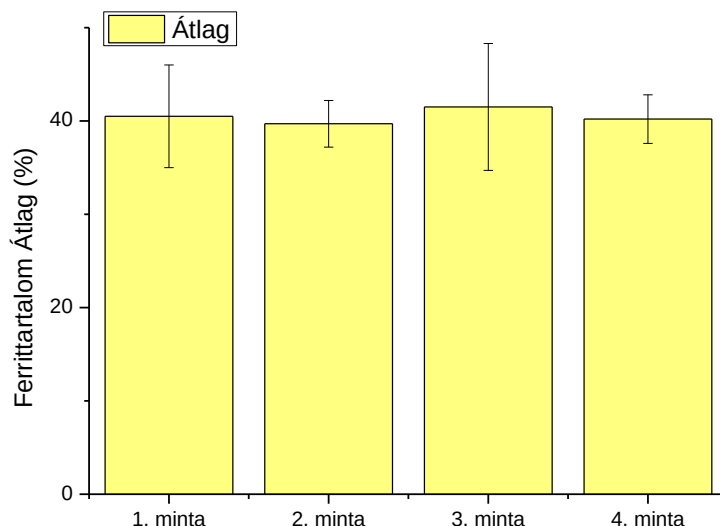
18. ábra A négy minta koronaszélességének és magasságának átlaga és szórása

Mint az látható a táblázatokból és diagramokból is, a töltött huzallal hegesztett varratok szélessége nagyobb, mint a tömör huzallal hegesztetteké, míg koronamagassága kisebb azokénál. A tömör huzallal hegesztett varratoknál az is észrevehető, hogy nincs számottevő különbség a varratok szélessége között a PMC Universal vagy PMC PCS hegesztési eljárások esetén. A koronamagasság esetén már jelentős eltérés (fél milliméter) fedezhető föl a két eljárás között. Ez a töltött huzal esetén módosul, ugyanis ennél a huzalnál jelentős eltérés található mind a koronaszélesség mind a koronamagasság esetén. Ráadásul fordított arányosság is felfedezhető, ugyanis a PMC Universal esetén nagyobb a koronamagasság, mint a PMC PCS eljárásnál, cserébe utóbbinál nagyobb a koronaszélesség.

A következőkben a Fischer típusú ferritszkóppal mért ferrit tartalmat értékelem ki. A ferritszkóp egy, az alapanyag mágneses tulajdonságait mérő műszer. Az általa mért anyag mágneses reakciója alapján meghatározza annak ferrit tartalmát, azt százalékos formában megadva. Nagyon érzékeny szerkezet, emiatt használatakor a levegőtől is el kell szigetelni (ezt egy kis 'lenyomható' csúszóhüvellyel tesszük), nehogy a levegő mágneses tulajdonságai fals eredményt adjanak. Az általam mért eredményeket a következő táblázatban és diagramon foglalom össze:

Ferrittartalom	PMC Univ. tömör	PMC PCS tömör	PMC Univ. töltött	PMC PCS töltött
Átlag	40,5	39,7	41,5	40,2
Szórás	5,5	2,5	6,8	2,6

4. táblázat A négy minta átlagos ferrittartalma, illetve szórása %-ban



19. ábra A négy minta ferrittartalma és szórása %-ban

Jól látható, hogy a ferrittartalom nem nagyon tér el a négy esetben, független a hegesztési technikától és huzaltípustól, átlagosan 40 % környékén van. Cserébe az is észrevehető, hogy a PMC Universal eljárásakor a szórás jóval nagyobb, mint a tömör mind a töltött huzalnál, mint a PMC PCS eljárásakor.

3.2 A minták metallográfiai előkészítése

A következőkben a metallográfiai laboratóriumban történő munkafolyamatot mutatom be, mellyel előkészítettem a mintákat a későbbi mikroszkópos, kémiai maratásos, elektrokémiai maratásos és korróziós vizsgálatokra.

Első lépésként a mintáinkból megfelelő darabokat vágunk ki. Ehhez a laborban található vágógépet alkalmazzuk, mellyel úgy tudunk adott méretű darabokat kivágni, hogy a vágás nem okoz nagy hőhatásokat, ezzel nem módosítja a hegesztéskor létrehozott hőhatásövezeteinket. Mindezt hűtőfolyadék adagolásával teszi.

Ezt követi a darab beágyazása, melyhez a mintákat egy-egy szilikon mintatartó tégelybe helyezzük, és a beágyazó porból (Duracyl plusz) és beágyazó folyadékból előre kikevert beágyazó anyaggal leöntjük majd elhelyezünk rajta a cetlit a minta adataival. Ezután a mintákat a szilikon formákat nyomás alá helyezzük egy edényben, beállítjuk a nyomást, és egy megadott ideig (nagyjából 20-30 percig) benn hagyjuk. Ez idő alatt a beágyazó anyag megszilárdul, kész a mintadarabunk.

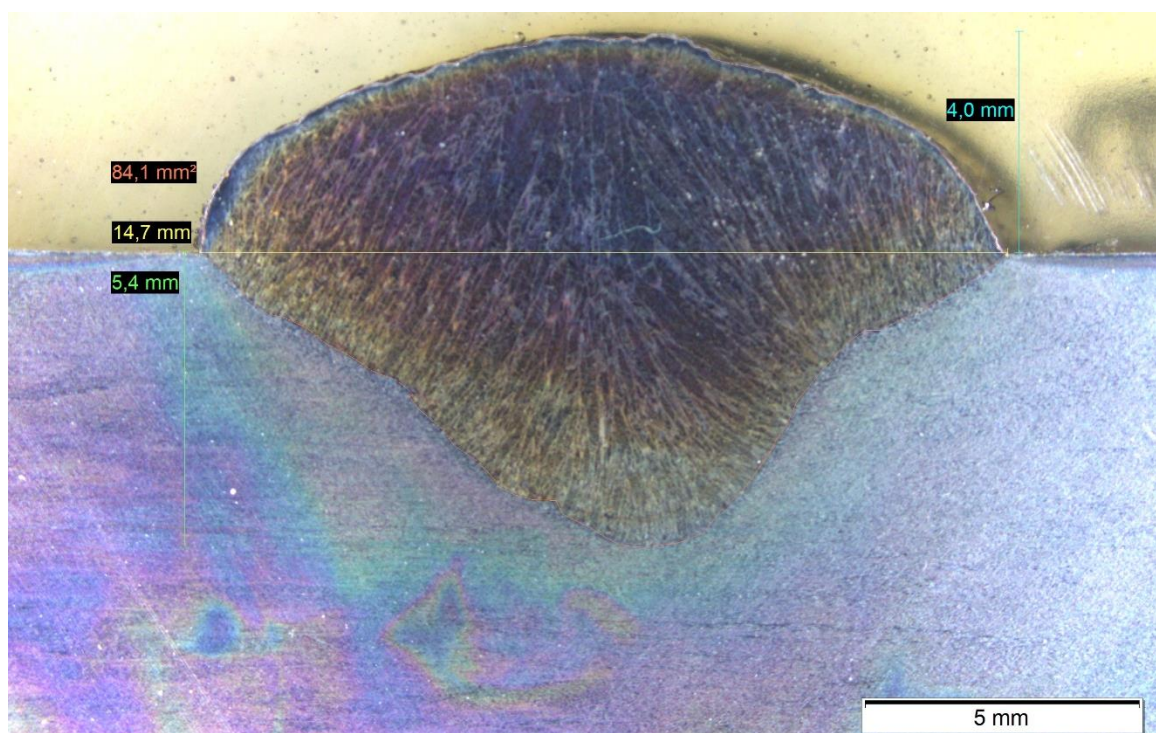
Ezt követi a csiszolás, ahol a minta felületét egyre finomodó csiszolópapírokon víz kíséretében csiszoljuk egyre simábbra. Ezt lépcsőzetesen tettem, először P320-as, majd P600-as, P1200-as, P2500-as végül pedig P4000-es csiszolópapírral. Igyekezni kell a csiszolópapírok cseréjekor, hogy lehetőleg a mintát az előző pozíciójához képest 90°-osan fordítsuk el. Ha befejeztük a csiszolást, akkor következik a polírozás. Polírozáskor megvan milyen szuszpenziót használunk az adott anyagokhoz, és az adott szuszpenzióhoz milyen szövet szükséges. Én 1 µm-es gyémánt szuszpenziót használtam. Ha esetleges karcok voltak felfedezhetőek a polírozás után, akkor vissza kellett térni pár lépéssel előbbre, a P1200-a vagy P2500-as papírral való csiszoláshoz. Ezt követően a darabokat alkohollal tisztítottam majd szárítottam.

3.3 A minták laboratóriumi vizsgálata

A minták előkészítése után következnek a minták vizsgálatára irányuló lépések. Ezek már a mikroszkópokkal és keménységmérővel történő mérések, valamint a korróziós és elektrokémiai maratásos vizsgálatok. Ezeket a méréseket és a belőlük levonható eredményeket és következtetéseket a következőkben mutatom be.

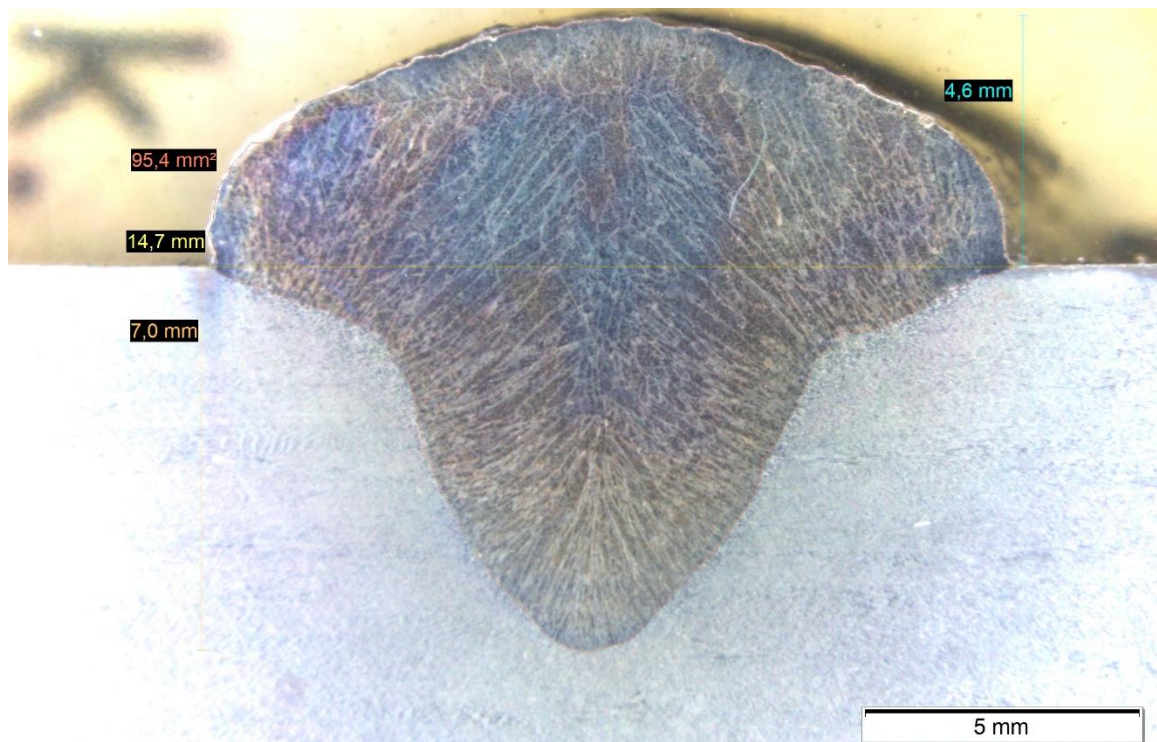
3.3.1 Sztereomikroszkópos geometriai mérések

A mintákat behelyezve a sztereomikroszkópba, pontos képeket tudtam róluk készíteni. Ezeket a képeket a Stream Essentials nevű programmal készítettem, és a későbbiekben méreteztem.



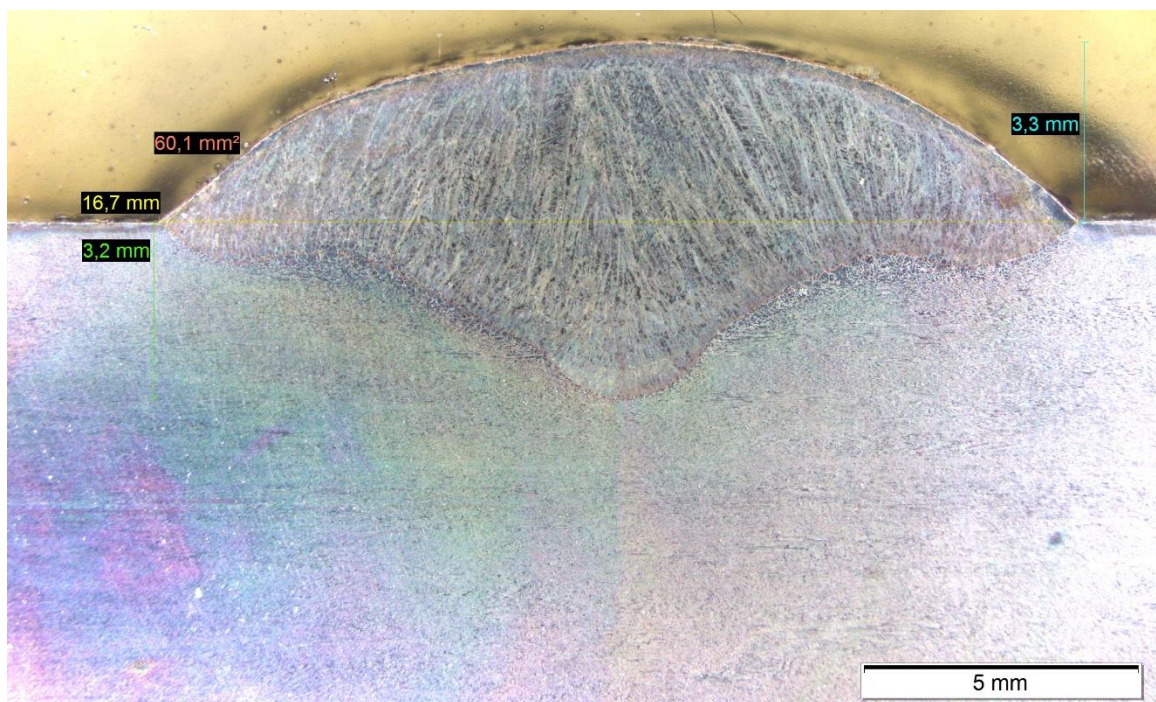
20. ábra Az első minta méretezett mikroszkopikus képe

Jól látható a képen, hogy aránylag mély varratgyöke és nagy koronája van a varratnak. Ezt a varratot PMC Universal eljárással készítettük, 394 A áramerősséggel, tömör duplex huzallal. Az is érdekes, hogy míg a programmal 14,7 mm-es koronaszélességet mértem, addig korábban kézzel átlagosan 14,5 mm-t mértem, sőt volt olyan érték a 10 mérésből, amely majdnem megegyezett a gépi értékkel. Ez által kijelenthető, hogy a mindkét mérés pontos volt, és valóban a kézzel mért átlagérték a varrat átlagszélessége.



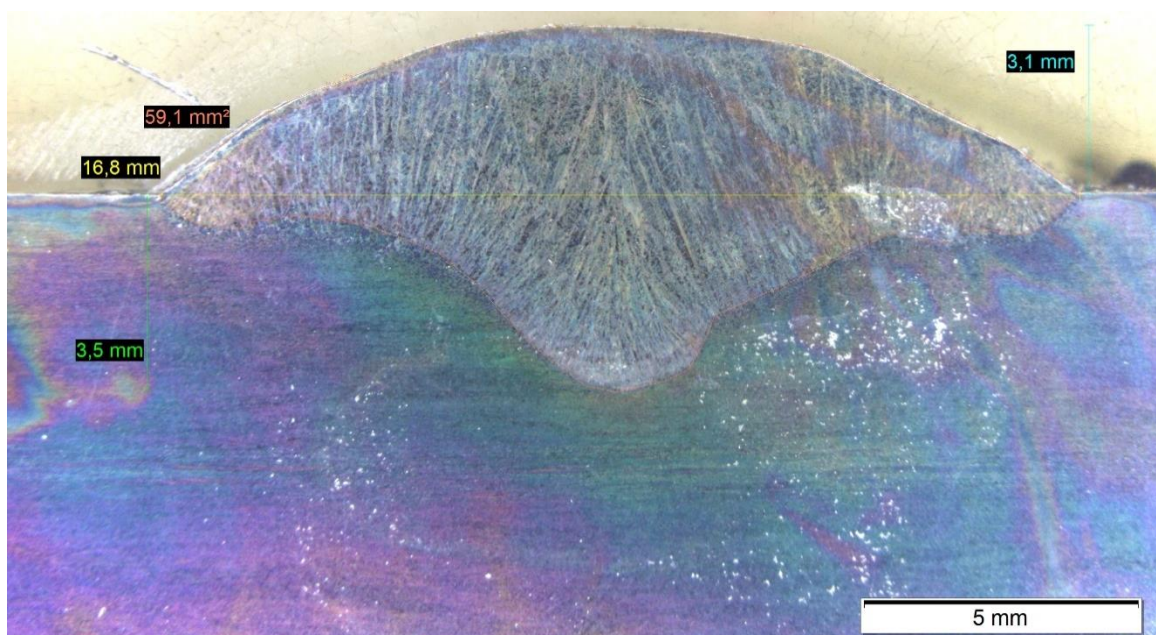
21. ábra A második minta méretezett mikroszkopikus képe

Ezen a képen rögtön szembetűnik, hogy ez a varrat jóval nagyobb gyökkel rendelkezik, mint az előző. Mivel azelőző varrat áramerőssége és ennek a varratnak a 401 A áramerőssége között nincs nagy különbség, és mindkettőt ugyanazzal a tömör duplex huzallal készítettük, így az egyetlen különbség az eljárásban rejthet. Ezt a varratot ugyanis a már korábban bemutatott PMC PCS eljárással készítettük. A varrat koronamagassága némileg nagyobb az első mintáénál. Érdekesség, hogy ennél a varratnál is hasonló értéket kaptam a programmal és a kézzel végzett koronaszélesség mérésre, így itt is tekinthető a kézzel mért átlagszélesség a valós átlagszélességnek. Ezen a képen tökéletesen látszik a varratgyök körül elhelyezkedő hőhatási övezet is, amely az előző képen nem látható annyira. Az is észrevehető, hogy a hőhatási övezet szerkezete különbözik mind a varratfém mind az alapanyag szerkezetétől, pedig nem alkalmaztunk nagy nagyítást.



22. ábra A harmadik minta méretezett mikroszkopikus képe

Az első észrevétel azezen a képen az, hogy a töltött huzallal készített varrat úgymond sokkal „laposabb”, mint a tömör huzallal készített. Mind a gyök mind a korona jóval kisebb, mint az előző, tömör huzallal hegesztett esetekben (korona úgy 25 %-kal, a gyök pedig akár 40-60 %-kal is). Itt azonban már észrevehető némileg nagyobb eltérés a programmal és a kézzel mért koronaszélesség között. Ennek egyik fő oka maga a koronának a kis magassága lehet, ami miatt nehezebb a tolómérővel pontosan megtalálni a varrat széleit. Cserébe a koronavastagság eredményei majdnem teljesen megegyeznek a szoftverrel, illetve a kézzel mért esetekben (3,3 és átlag 3,3 mm). Ez a varrat is PMC Universal eljárással készült, 369 A áramerősségen.



23. ábra A negyedik minta méretezett mikroszkópi képe

Ez a varrat úgyszintén töltött huzallal készült, PMC PCS eljárással 299 A áramerősségen. Azonban, mint látható, ebben az esetben a koronamagasság és a varratmélység is nagyjából megegyezik a harmadik minta adott értékeivel. Ebben az esetben azonban kisebb eltérés fedezhető fel (a töltött huzalokhoz képest még mindig nagyobb eltérés) a koronaszélesség kézzel és programmal mért értékei között, mint a harmadik mintánál. Viszont megfigyelhetjük a két töltött huzallal hegesztett varrat esetén azt is, hogy ezen varratok keresztmetszete jóval kisebb, mint a tömör huzallal hegesztett varratoké.

3.3.2 Varratok Formatényezőjének kiszámítása

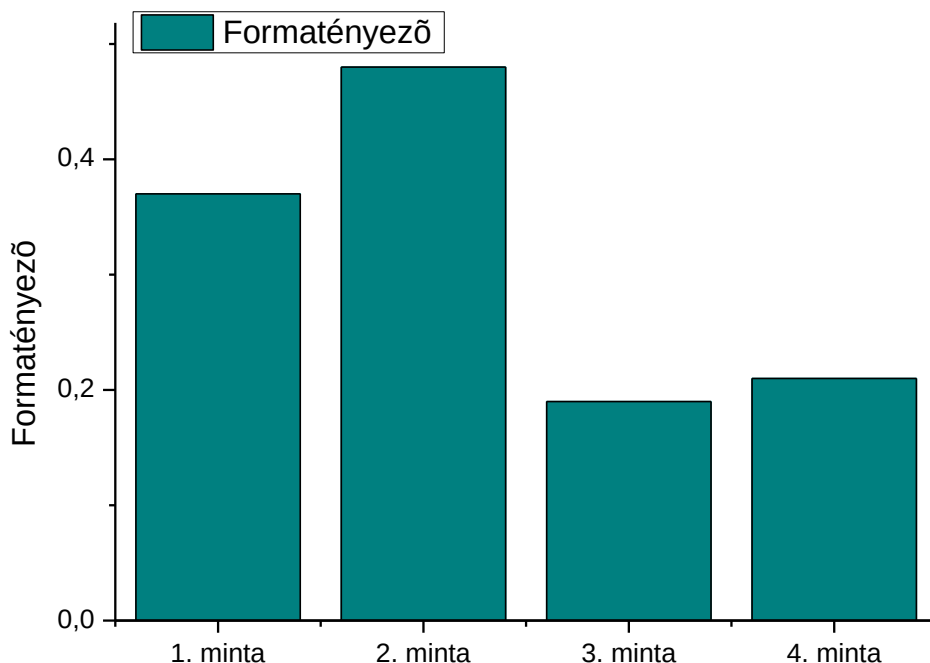
A következőkben a sztereó mikroszkópos méretezést felhasználva kiszámítom a négy varratom formatényezőit. Ehhez az alábbi képletet alkalmazom:

$$\text{Formatényező} = \frac{D}{w} = \frac{\text{mélység}}{\text{szélesség}}$$

Az így kapott eredményeket táblázatba, majd grafikonba viszem:

	1. minta PMC Univ. tömör	2. minta PMC PCS tömör	3. minta PMC Univ. töltött	4. minta PMC PCS töltött
Formatényező	0,37	0,48	0,19	0,21

5. táblázat A formatényező számítások eredményei a négy mintára



24. ábra A minták formatényezői

3.3.3 Elektrokémiai maratás mikroszkópi képeinek kiértékelése

3.3.3.1. Elektrokémiai maratás menete

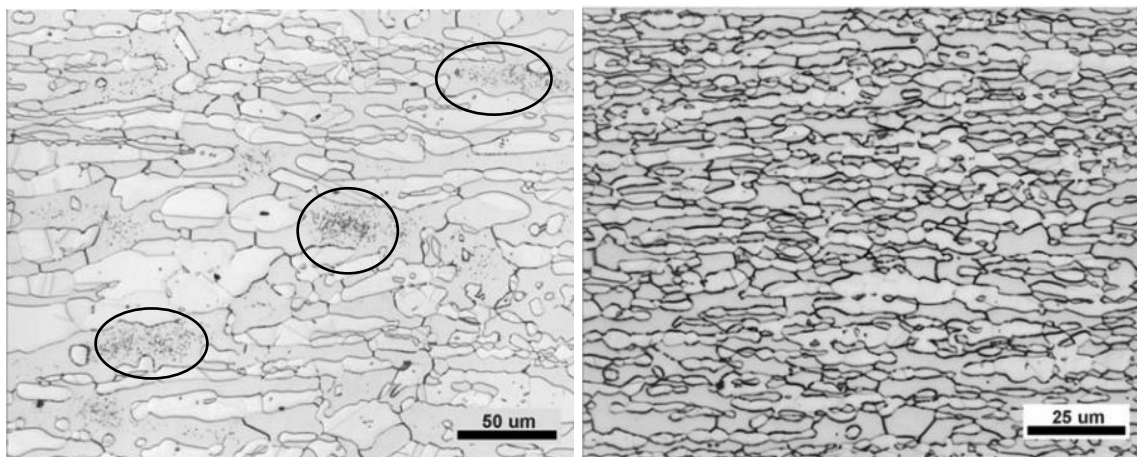
Az alkalmazott elektrokémiai maratás az anyagban képződött nitridek és karbidok kimutatására alkalmas. Az eljárás előkészületeket igényel, melyeket a következőkben bemutatok. A maratást ASTM A1084 szabvány alapján kell végezni, mely a következőket írja elő: A maratáshoz szükséges alapanyag az oxálsav ($C_2O_4H_2$), melyet 10 g reagens oxálsav 90 ml desztillált vízben való oldásával lehet előállítani. Ha növeljük az összmenyiséget, az arányokat megtartva keverjük ki a savat. Ez után előkészítettük a mintákat, melyek az eredeti mintával megegyező méretűek voltak, 20 mm-es vastagsággal. Ezeket a mintákat passziváltam, majd felcsiszoltam 2400-as fokig, majd 3 μ m-es gyémánt szuszpenzióval políroztam, majd alkohollal átmostam a darabokat. Ezt elvégezve összeállítottam a berendezést. A mintákat helyeztem a pozitív pólusra, a minta anyagával megegyező darabot a negatív pólusra. Ezeket műanyag mintatartókba helyeztem, majd próbáltam egymással szembe pozícionálni őket. Emellett elhelyeztem egy hőmérőt is, hogy a reakció során fellépő hőváltozás mértékét is nyomon tudjam követni. Az üvegtégelyt melybe elhelyeztem őket megtöltöttem az oxálsavval, majd bekapcsoltam az áramforrást. Az áramforrást 6-7 V közötti feszültségre állítottam, ekkor heves buborékképződés (hidrogénképződés) volt észrevehető a mintámon. Ezt az állapotot egyszer 20, majd 10 másodpercig, végül pedig a maratott minták minőségének majdnem teljes egyezése miatt nagyjából 15 másodpercig tartottam a maratási közegben. Ezután kikapcsoltam az áramforrást, kivettem a mintát, lemostam őket, alkohollal tisztítottam és mikroszkóppal vizsgáltam. A folyamat során minimális hőváltozás volt tapasztalható, így az eredeti szabványban előírt hűtőfürdő elhagyható volt.



25. ábra Elektrokémiai maratás elrendezése

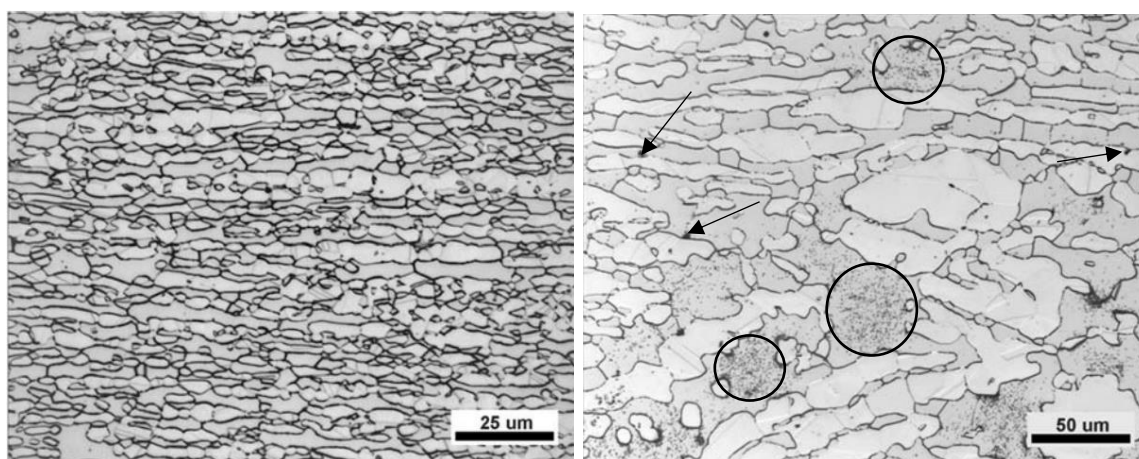
3.3.4 Mikroszkópi képek kiértékelése

A következőkben az elektrokémiai maratás után végzett mikroszkópi vizsgálatoknál készített képek és a szabványban szereplő mintaképek összehasonlításával elemzem a vizsgálat eredményeit. Először bemutatom és kielemezem az olvasott irodalomban található példákat a nem megfelelő eredményt adott mérésekről, negatív példákról.



26. ábra Oxálsavas elektrokémiai maratáskor kimutatott káros fázisok 1. [16]

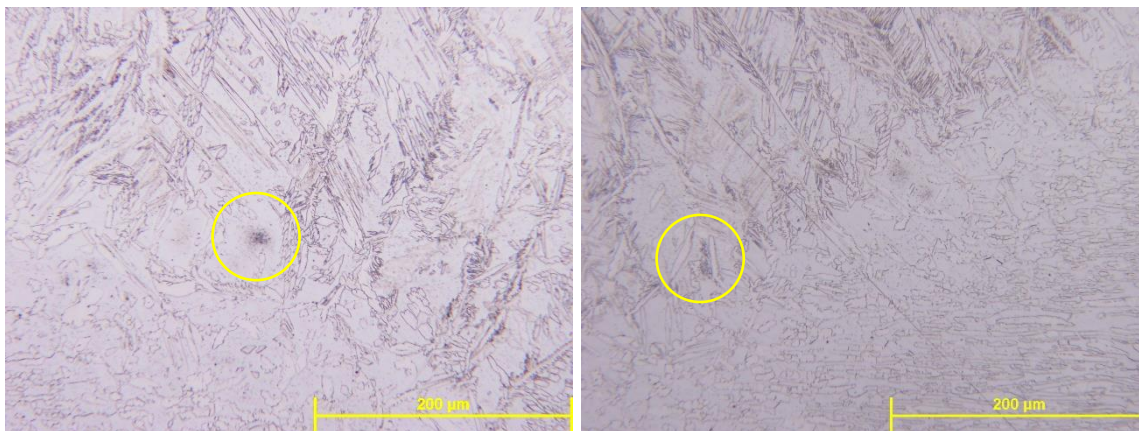
Az előbbi képeken jól láthatóak azok a kialakult káros fázisok, melyeket az általunk elvégzett oxálsavas elektrokémiai maratás ki tud mutatni. Az egyik ilyen alapvető kiválás az a nitrid kiválás, mely jellemzően a ferritben történik. Ez nagyon jól látható a 23. ábra baloldali mintáján, melyen több ilyen nitrid kiválás is észrevehető. Ezeket a kiválásokat karikázással jelöltem, és jelölöm a következőkben is. A másik ilyen hiba, ami a jobboldali képen látható, az a fázishatár megvastagodása. Azonban megjegyzendő, hogy az ehhez a méréshez tartozó olvasott irodalom alapján [16] ezek a minták még megfelelnek, elfogadható eredmény nyújtanak.



27. ábra Oxálsavas elektrokémiai maratáskor kimutatott káros fázisok 2. [16]

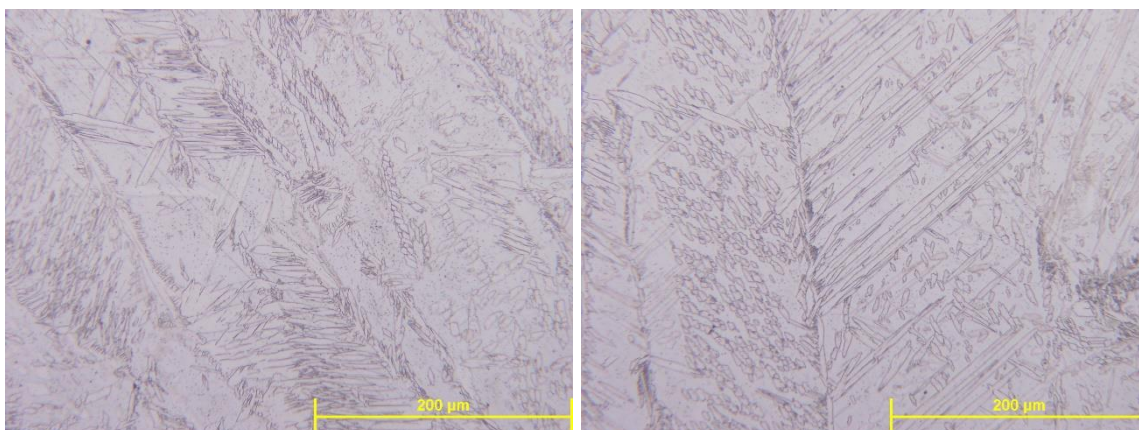
A 24. ábrán látható képeken további hibák vehetőek észre. A baloldali kép még jelentősebb fázishatár vastagodás vehető észre. A jobboldali képen pedig a nitridkiváláson kívül egy másik hiba is észrevehető. Ezek pedig a fázishatáron létrejövő kiválások. Ezek a minták már nem feleltek meg, hibás mintáknak tekinthetőek.

A következőkben az általam készített elektrokémiai maratásos mikroszkópi képeket értékelem ki az előbb bemutatott nem elfogadható, illetve megfelelő mintákhoz hasonlítva azok szerkezetét.



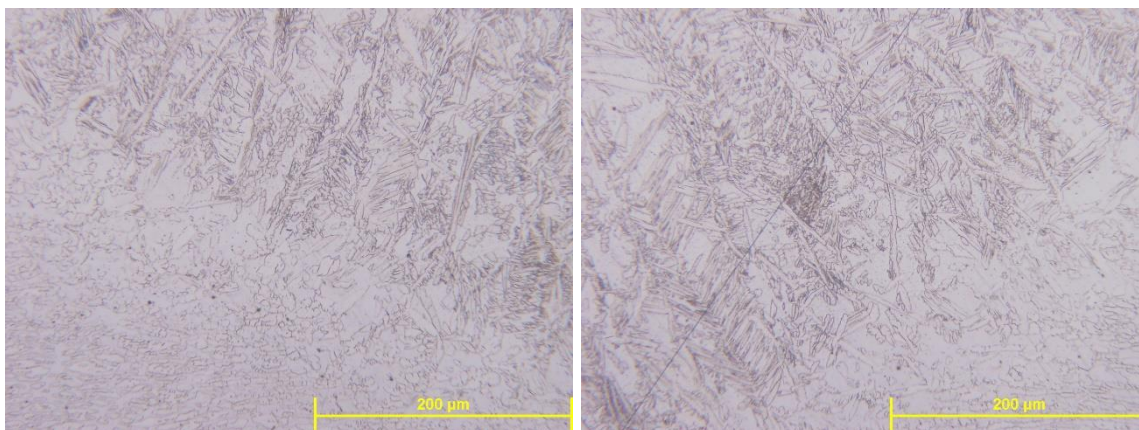
28. ábra 1. minta hőhatási övezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után.

Az előbbi képeken jól látható, hogy a hőhatási övezet ferritjében némi nitrid-kiválás van jelen. Ez nem annyira jelentős, azonban ez is negatív módon hathat az acél tulajdonságaira. A maratás során fázishatárvastagodás egyáltalán nem vehető észre a mintában, és a felfedezhető nitridkiválás is elenyésző az olvasott irodalomban megfelelőnek jelölt minta nitridkiválás mennyiségéhez képest is. Így az első mintát megfelelőnek tekintem.



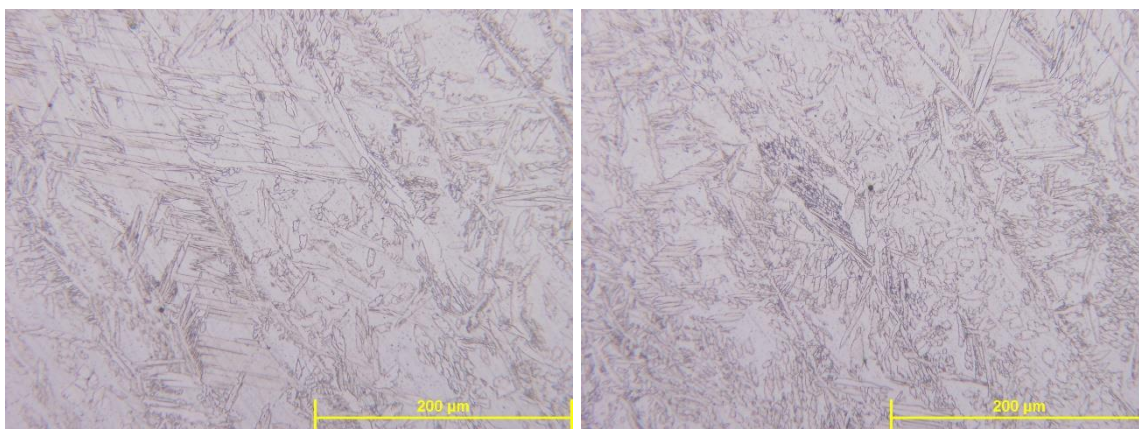
29. ábra 1. minta varratfémének szövetszerkezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után

Az előbbi képeken is jól látszik, hogy az első mintában nem találhatóak fázishatárvastagodások, teljesen megfelelő ausztenites ferrites szerkezet alakult ki a varratfémekben. Ez is tovább erősíti azt a tézist, hogy az első minta megfelelő eredményt adott az elektrokémiai maratásos mérésnél.



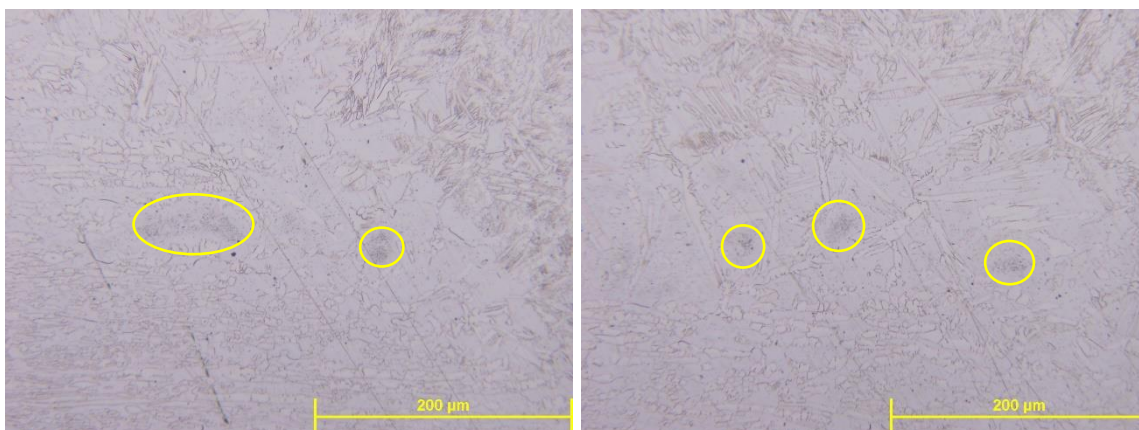
30. ábra 2. minta hőhatái övezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után

Jól látható a fenti képeken, hogy a második minta hőhatási övezetének ferritjében nem található nitridkiválás. Elhanyagolható fázishatárvastagodás megfigyelhető, de a megfelelőnek számító olvasott irodalomban található mintákban lévő vastagodásokhoz képest nem jelentős.



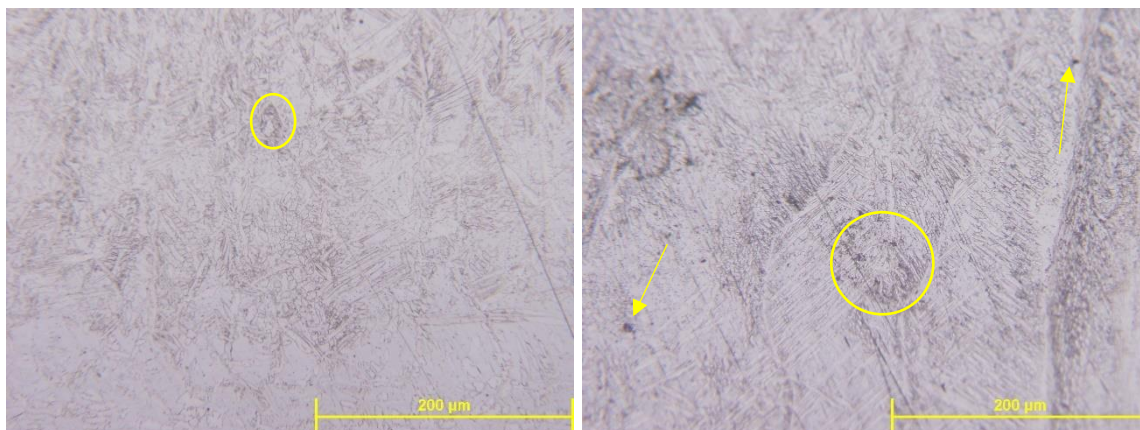
31. ábra 2. minta varratfémének szövetszerkezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után

A második minta varratfémének szövetszerkezetében sem található számottevő hiba, sem fázishatárvastagodás, sem a fázishatárokon történő kiválás. Így ezt a mintát is megfelelőnek tekintem.



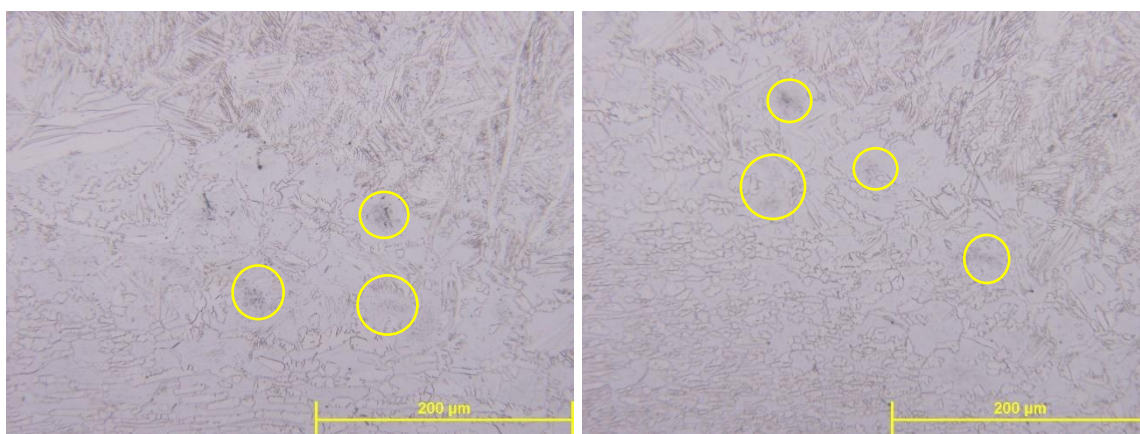
32. ábra 3. minta hőhatási övezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után

Mint látható a 29. ábra képein, a harmadik minta hőhatási övezetében több nitridkiválás is található. Még ez is az elfogadható, ám érdekes, hiszen az 1. mintához képest semmiben sem tér el, ugyanazzal a hőbevitellel készült, ugyanúgy PMC Universal eljárással készült. Az egyetlen különbség a huzal, hiszen a harmadik minta már töltött huzallal készült, ellentétben az első két mintával, melyek tömör huzallal. Érdekes lesz nyomon követni, hogy ezzel a huzallal hegesztett mintákban a továbbiakban is megtalálhatóak-e ezek a hibák, és továbbra is nagyobb mértékben, mint a tömör huzallal hegesztett mintákban.



33. ábra 3. minta varratfémének szövetszerkezete Oxálsavas elektrokémiai maratás után

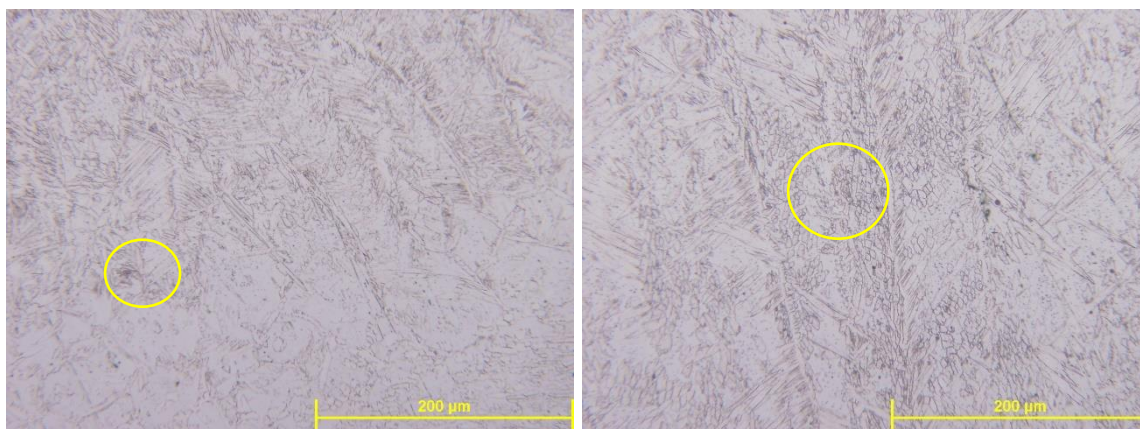
Mint látható, a varratfém szövetszerkezetének felvételeiből, a varratszövetben minimális fázishatárvastagodás látható, valamint a jobboldali képen fázishatármenti kiválások. Azonban felvetődik a kérdés, nem maratási hibákat látunk-e a képen, mert az is egy lehetséges opció. Azonban, ha nem is maratási hibákról van szó, akkor is mindkettő fellépő szöveti hiba nagyon minimális. Ennek fényében megfelelő a minta, hisz a jelenlévő hibák elhanyagolhatóak az olvasott irodalomban szereplő, még ott is elfogadhatónak tartott hibák mennyiségéhez képest. Azonban itt is megfigyelhető, hogy a tömör huzallal hegesztett mintákhoz képest több ilyen jellegű rendellenesség található a varratfém szövetszerkezetében, ez is valószínűleg a huzal típusával hozható összefüggésbe.



34. ábra 4. minta hőhatási övezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után

Látható a negyedik minta hőhatásövezetén, hogy az eddigi mintákhoz képest jóval nagyobb mennyiségű, és esetenként durvább nitridkiválások is megfigyelhetők. Mint a harmadik mintánál is szóba került, itt is egyedül a huzal különbözteti meg a mintát a második mintától,

mellyel az áram- illetve hőbevitel megegyezik, és az eljárás is (PMC PCS) azonos. Ezek ellenére véleményem szerint ez a minta is elfogadható.



35. ábra 4. minta varratfémének szövetszerkezete. Oxálsavas elektrokémiai maratás után

Itt is hasonlóan lehet kielemezni a varratfém szövetszerkezeti felvételeit, mint a harmadik mintánál, némi fázisvastagodás, és némi fázismenti kiválás mintha észrevehető lenne, de ezek lehetnek ebben az esetben is maratási hibák.

3.3.5 Következtetések levonása a mikroszkópi képek alapján

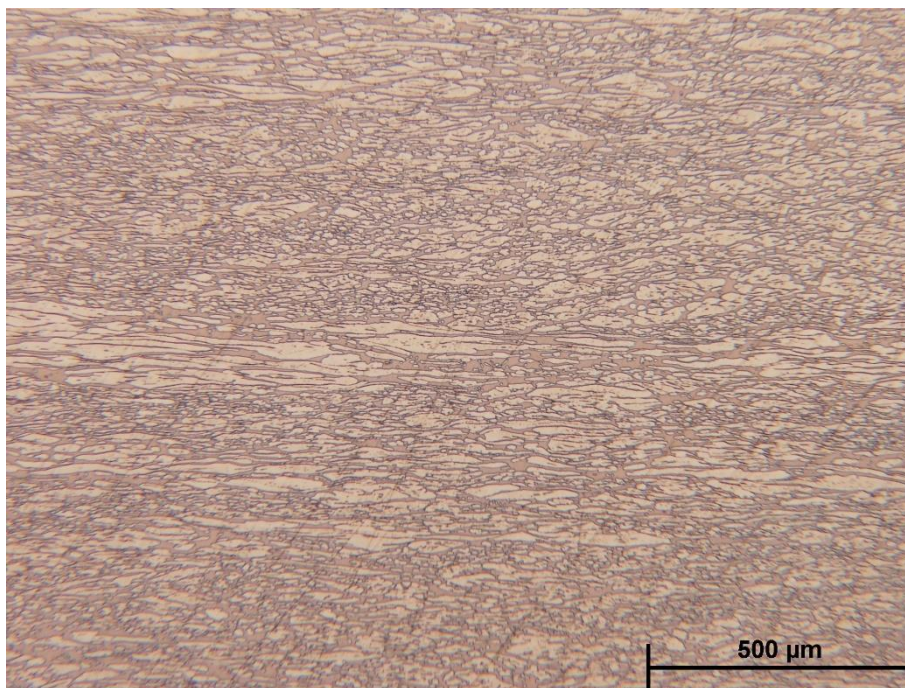
Végig tekintvén az elektrokémiai maratásos minták mikroszkópi képét, sok érdekességet megtudtam állapítani. Egyrészt, hogy a huzal nagy különbséget tud okozni, mint látható is volt a tömör 2209-es tömör és a töltött 2304-es huzalokkal hegesztett minták között is, egész pontosan az 1-es és 2-es, valamint a 3-as és 4-es minták között. Erre több magyarázat is lehet, egyrészt, hogy a töltött huzalban voltak találhatóak olyan alkotók, ötvözők, melyek a nitrdek, fázisvastagodások kialakulását elősegítették, de akár a huzal 'alapfémének' mivolta is befolyásolhatta. Ezen felül fontos észrevétel volt az is, hogy hiába volt egyes mintáknál több kialakult hiba, ezek a hibák még mindig elhanyagolhatóak az olvasott irodalomban [16] található példákhoz képest. Így összességében a végkövetkeztetésem az, hogy az elektrokémiai maratásos vizsgálat megfelelő eredményeket hozott, elfogadható minden mintám ebből a szempontból, nem találhatóak a szövetszerkezet általam mért részén olyan hibák, melyek jelentős káros hatással rendelkeznének.

3.3.4 Kémiai maratás menete és kiértékelése

A következőkben a mintákon végzett kémiai maratást mutatom be részletesen, majd pedig a mikroszkóppal készített képeket elemezem ki.

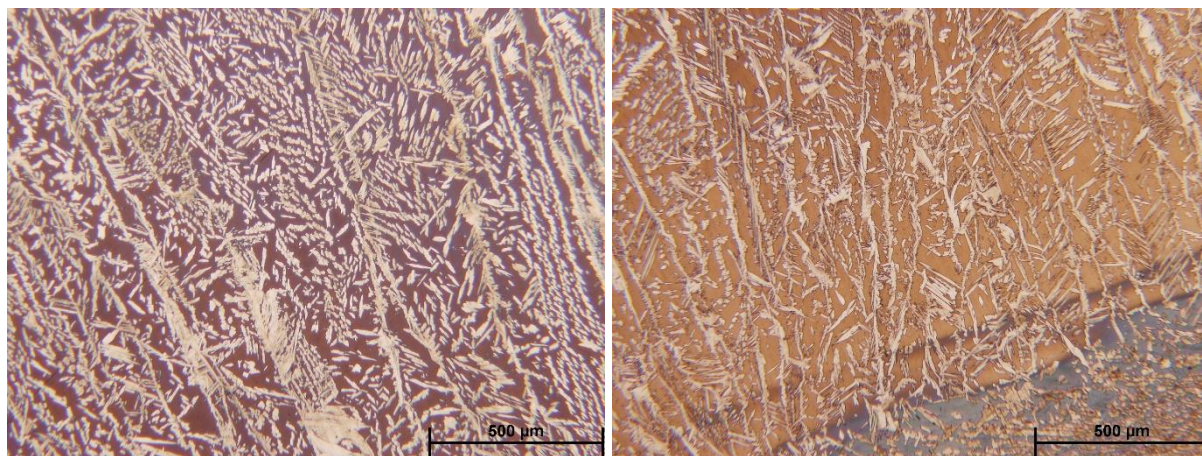
A maratást a marószer kikeverésével kezdtük. Egy módosított Beraha marószert kevertünk ki, mely 60 ml desztillált vízből, 30 ml sósavból (HCl) és 0,75 g kálium-piroszulfidból ($K_2S_2O_5$) áll. Ezt kevertük, ameddig el nem elegyedett teljesen. Ez a marószer egy szulfidréteget rak a ferrit fázisra, amitől a mintában található ausztenit világos színű marad, a ferrit pedig sötét színű. Maratáskor a kettes mintát nagyjából 13-14 másodpercig, a többi mintát pedig nagyjából 18-20 másodpercig marattuk.

A maratáskor kapott mintákat mikroszkóppal vizsgáltam, és a mikroszkóppal készített képeket a következőkben elemezem ki.



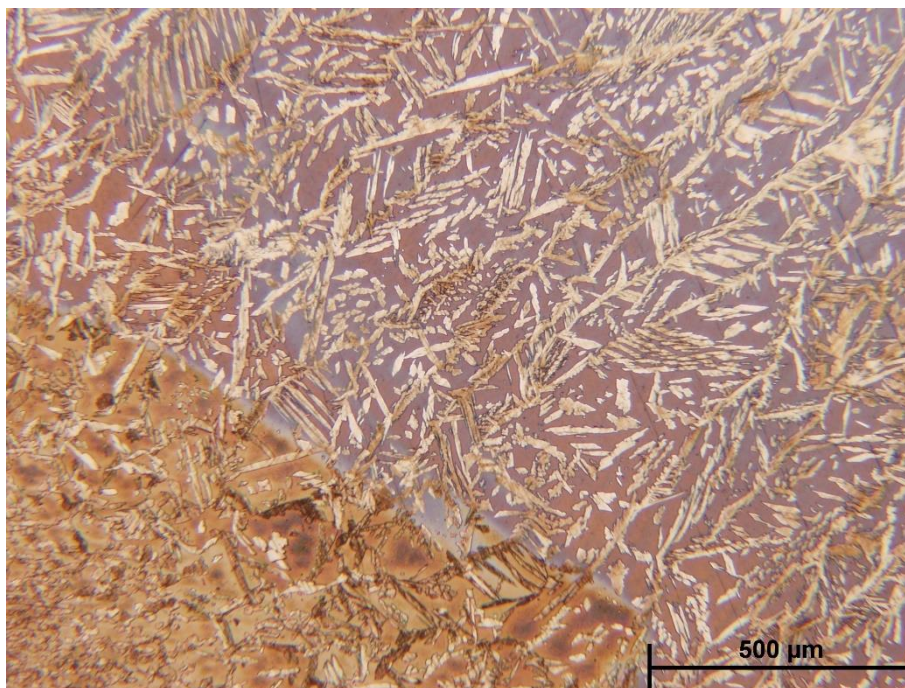
36. ábra Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvétel a 2120-as alapanyagról.

Jól látható, már az alapanyag szövetszerkezeténél is, hogy a maratás jól működött, a ferritet sötétebb színnel emelte ki, az ausztenitet pedig világosabb színnel jelöli. Észrevehető a duplex acélokra jellemző, nagyjából 60-40 %-os ausztenit-ferrit fáziseloszlás is. Ezen felül nem láthatóak jelentős hibák, fázishatárvastagodások.



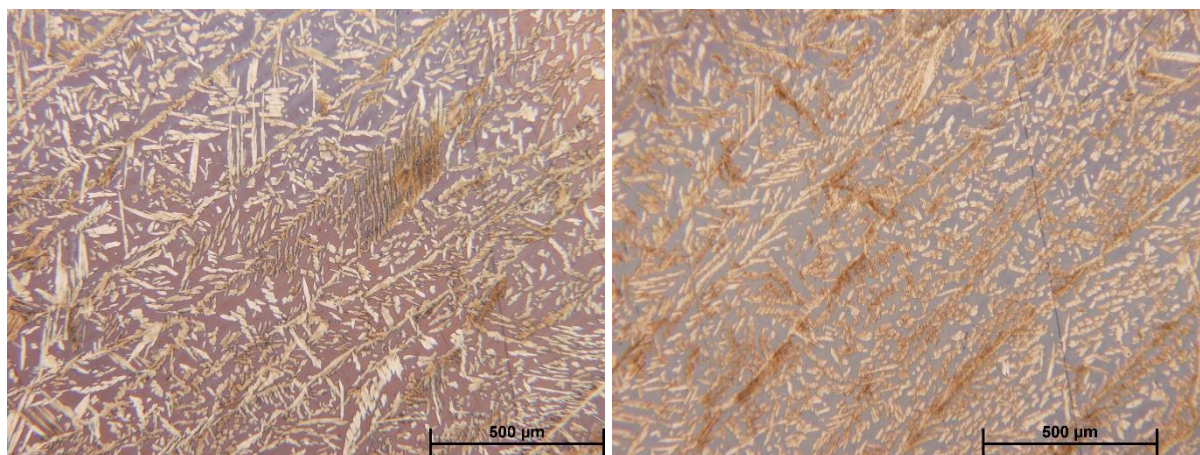
37. ábra 1. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvételei a varratfém szövetéről és hőhatásövezetéről

Látható az 1. mintáról (PMC Univ. töltött huzallal) készült képeken, hogy a maratás a varratoknál is sikeres volt, tökéletesen megkülönböztethetőek a ferrit és az ausztenit fázisok. Itt se láthatóak fázisvastagodások vagy más jellemző hibák. Ezen felül látható a hőhatásövezetben is az átmenet a varrat és az alapfém között. A varratfémbe található ferrit szemcsék átlagos hossza 100-150 μm közé esik, míg a közöttük lévő teret 75-150 μm-es ausztenit szemcsék töltik ki. Az első minta hőhatási övezetének vastagsága átlagban 350-400 μm közé esik.



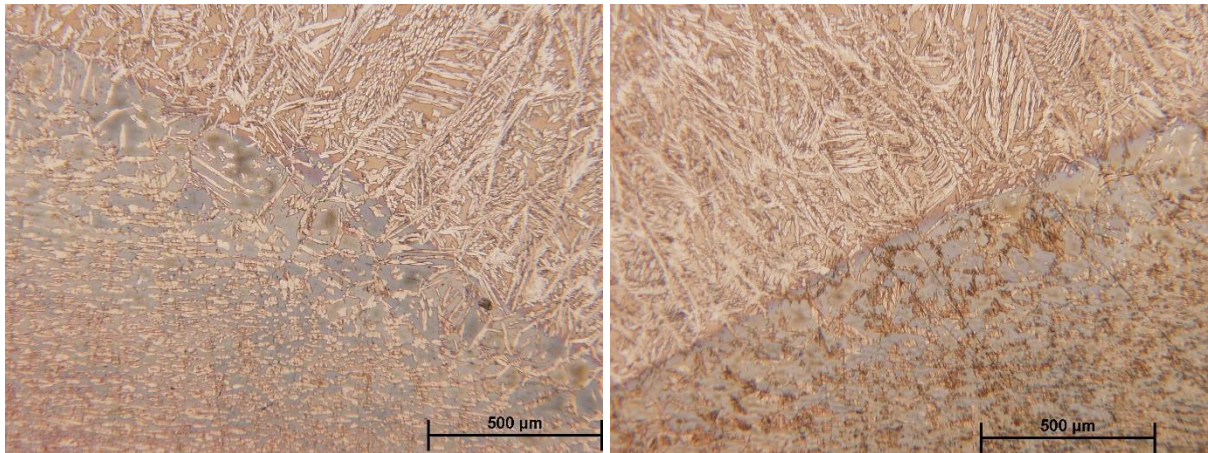
38. ábra 2. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvétele a hőhatásövezetéről

A 2. minta (PMC PCS tömör huzallal) hőhatásövezetét bemutató képen jól látszik, hogy a szemcseszerkezet miként változik meg a varratfémhez képest. A 2. minta hőhatásövezetének szélessége nagyjából 200-400 μm közötti tartományban van.



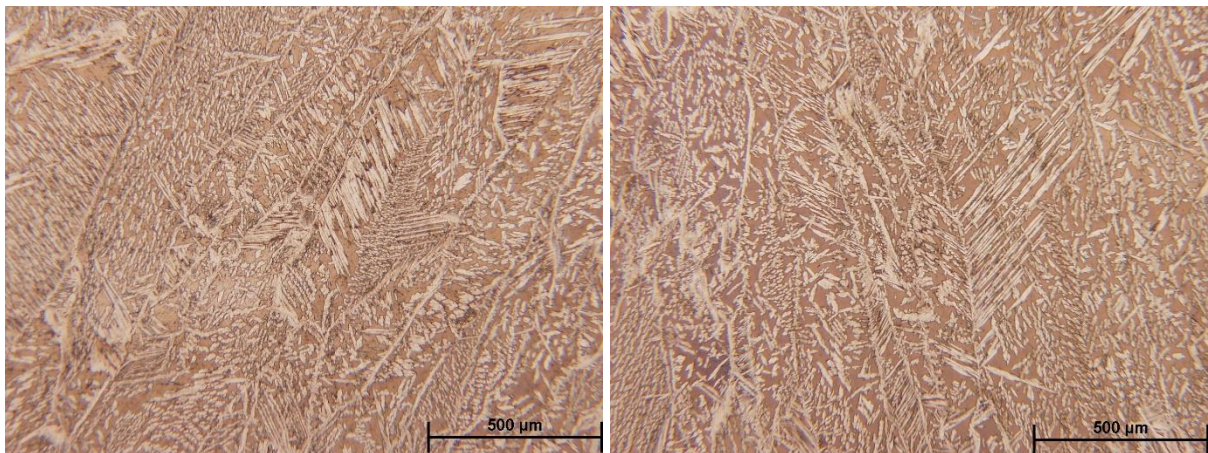
39. ábra 2. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvételei a varratfém szövetéről

A varratszövetet ábrázoló mikroszkópi képeken is jól látható az előző mintán is jellemző, duplex acélokra jellemző fázisarány eloszlás. A varratban található ausztenit szemcsék jellemző mérete 25-150 μm közé esik. Az ausztenit szemcsék közötti teret töltik ki a ferrit szemcsék, változatos méretekkel.



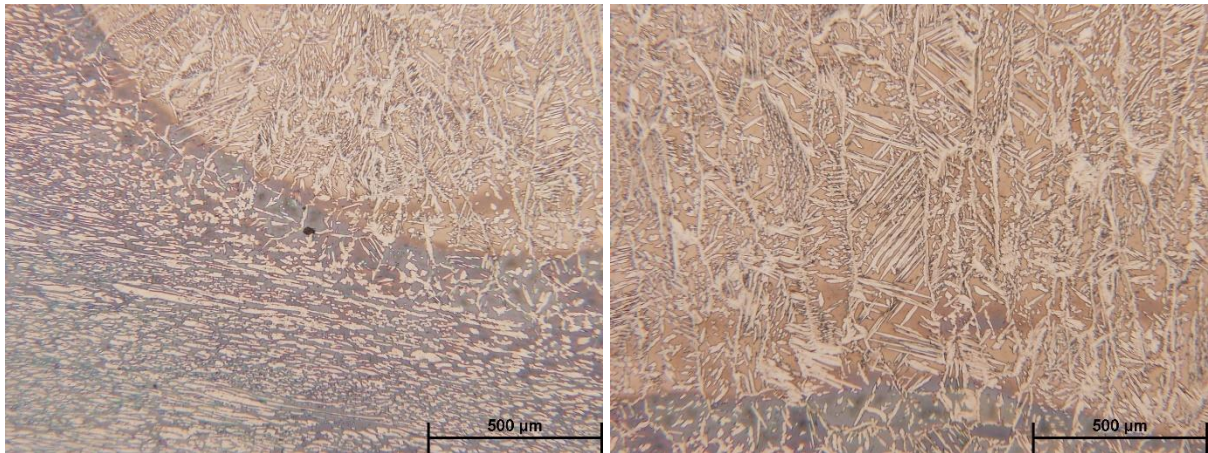
40. ábra 3. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvételei a hőhatásövezetéről

A harmadik minta hőhatásövezetei láthatók a varrat mindkét feléről az előbbi képeken. Ezekről jól lemérhető, hogy a harmadik minta (PMC Univ. töltött huzallal) hőhatásövezetének átlagos vastagsága nagyjából 400 és 550 μm közötti.



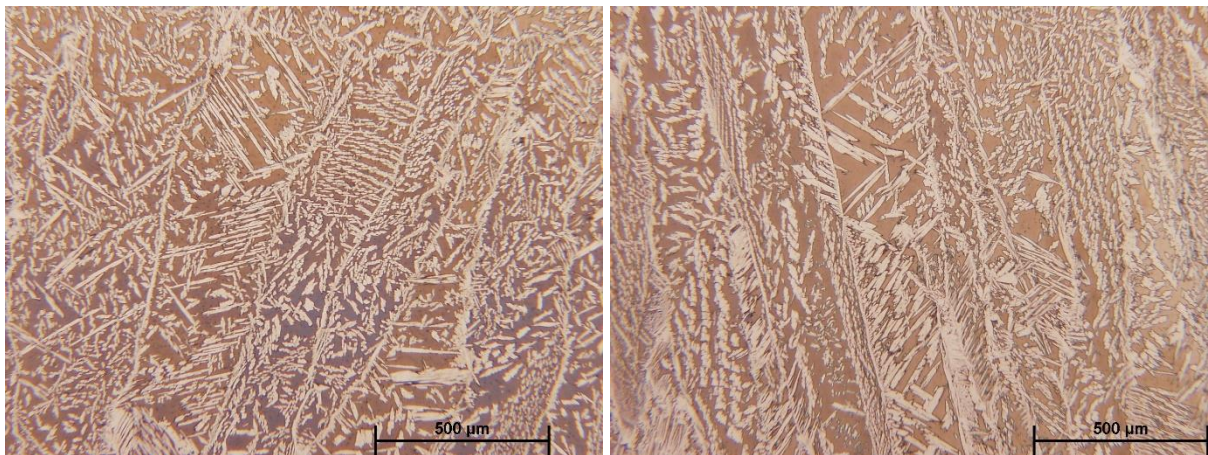
41. ábra 3. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvételei a varratfém szövetéről

Észrevehető, hogy a 3. minta varratfémek szövetszerkezetében már némileg nagyobb arányban találhatóak ausztenit szemcsék, mint a korábbi tömör huzallal készített varratoknál. Ezen ferrit szemcsék jellemző mérete 25-200 μm közötti. A közöttük lévő teret átlagban 25-40 μm vastagságú ausztenitszemcsék töltik ki.



42. ábra 4. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvételei a hőhatásövezetéről

Az előbbi képeken láthatóak a 4. minta (PMC PCS töltött huzallal) hőhatásövezetei, melyeknek átlagos mérete 100-300 μm .



43. ábra 4. minta Beraha módszerrel történt kémiai maratással kapott szövetszerkezeti felvételei a varratfém szövetéről

A 4. minta varratszövetének képein (40. ábra) is látható az eddig jellemző ausztenit-ferrit arány. A varratszövetben található ausztenitek jellemző mérete 25-200 μm , míg a szemcsék közötti teret 25-100 μm nagyságú ferrit szemcsék töltik ki.

Bár láthatóak helyenként kisebb hibák a mintákon, ezek inkább egy hátramaradt szennyeződés által okozott vagy egy maratási hibák lehetnek, esetleg a csiszolásból vagy polírozásból hátramaradt szennyeződések. Ezt leszámítva sem fázisvastagodásokat, sem más kristályszerkezeti hibát nem lehet felfedezni. A fázisok hasonlóan az előző mintákhoz tökéletesen megkülönböztethetőek.

Összességében a kémiai maratást sikeresnek tekintem, ennek több oka is van, melyeket most részletezek. Először is, mint minden mintánál megemlítettem, a fázisok tökéletesen megkülönböztethetőek, az adott fázis színe tökéletesen megfelel a szabványban leírtaknak. Ezen felül az ausztenitet az iker fázishatárok segítségével lehet megkülönböztetni. Kijelenthető az is, hogy a négy minta varratképei között semmi különbség nincs, mindegyik tökéletesen kiadja a benne található fázisokat, sőt, mindegyikben ugyanazok a fázisok találhatóak. Ezt jól

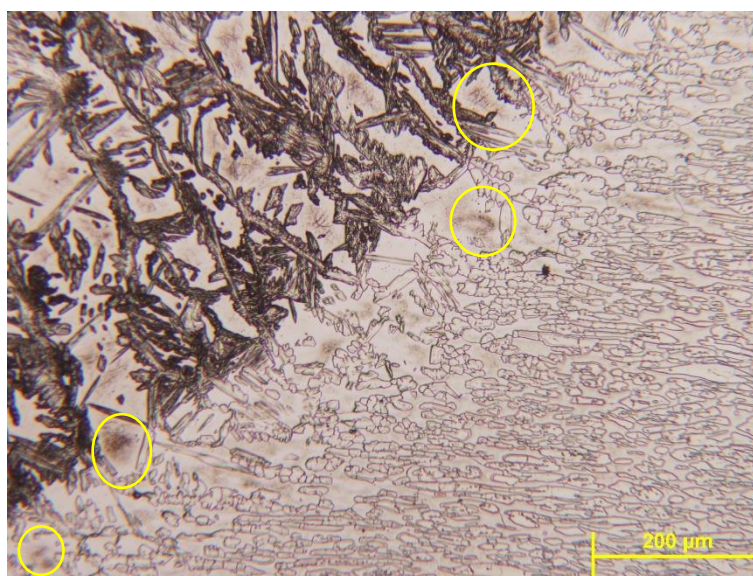
bizonyítja az is, hogy ránézésre is megegyezik a varratszövet ferrit és ausztenit tartalma a ferritszkóppal mért 40-60%-os aránnyal. Ebből arra következtethetünk, hogy az acéltípus hegesztésére tökéletesen megfelel mind a tömör, mind a töltött huzal, hiszen mindkét huzalra tökéletesen megegyeztek a varrat kristálytani tulajdonságai.

3.3.5 Salétromsavas elektrokémiai maratás

3.3.5.1 Vizsgálat leírása

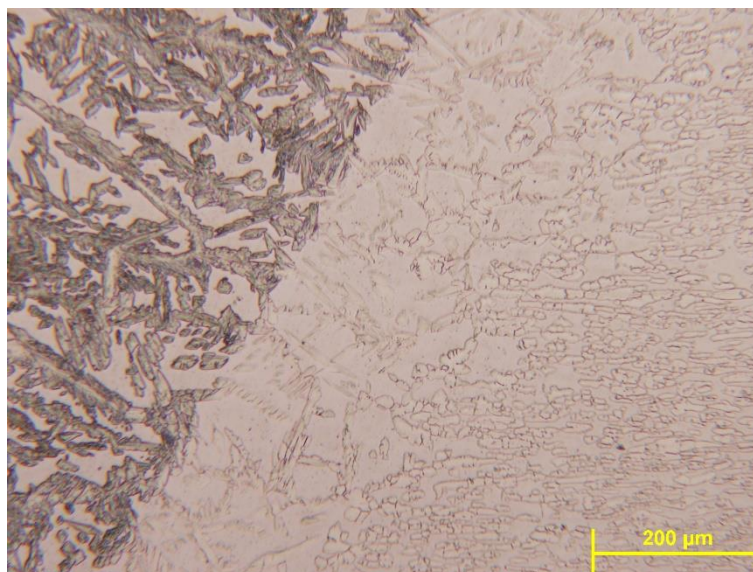
A következőkben a mintáimon elvégzett másik elektrokémiai maratás menetét és eredményeit mutatom be. Ez a maratás az ASTM E 407 szabvány alapján végzett eljárás, melynél a marószer 60 %salétromsavat (HNO_3) és 40 % desztillált vizet tartalmaz. Az előző elektrokémiai maratáshoz hasonló összeállítást alkalmaztam ennél az eljárásnál is. Korrózióálló acéloknál tipikusan 1-2 V feszültséget ír elő a szabvány, amely feszültségen 10-120 másodpercig kell a mintákat a marószerben tartani. Intermetallikus vegyületek és nitridkiválások kimutatására alkalmas ez az eljárás, mely sötétíti a ferrit szemcséket. Itt is a vizsgálandó mintát kötöttem a pozitív pólusra, míg a minta anyagával megegyező darabot a negatívra. Fontos megjegyezni, hogy nagyjából mindössze 20 másodpercig tartottam a mintákat az áramforrás bekapcsolása után a marószerben. A mérés beindítása után minden esetben heves buborék (hidrogéngáz) képződés jelentkezett. A vizsgálatok elvégése előtt szükséges volt a minták csiszolása és polírozása. Így 4000-es fokig felcsiszoltam a mintákat, majd 3 μm -es gyémánt emulzióval felpolíroztam őket.

3.3.5.2 Mikroszkópi képek kiértékelése



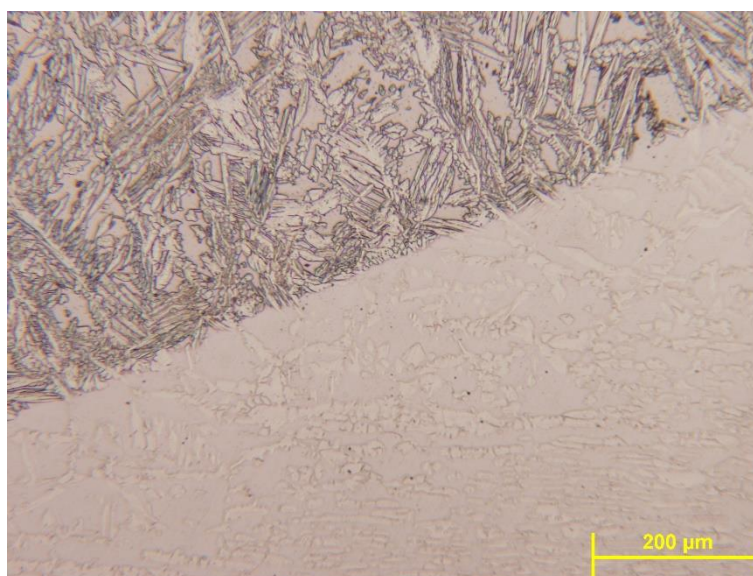
44. ábra 1. minta salétromsavas elektrokémiai maratással kapott mikroszkópi felvétele

Látható a mikroszkópi ábrán, hogy a második elektrokémiai maratás is mutatott ki némi nitridkiválást az első mintán, a minta hőhatásiövezetében. Ez a nitridkiválás azonban nem jelentős, ettől még elfogadható a minta. Némi fázishatárvastagodás is felfedezhető, ám ez sem jelentős.



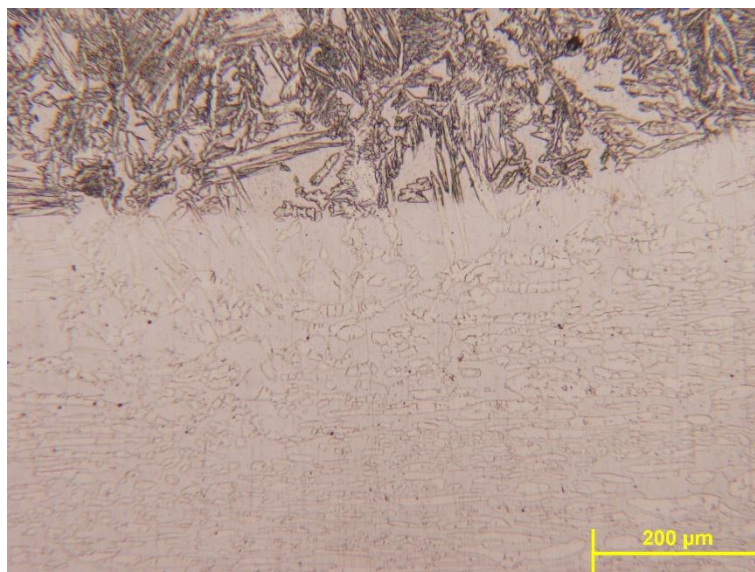
45. ábra 2. minta salétromsavas elektrokémiai maratással kapott mikroszkópi felvétele

A képen a második minta mikroszkópi képe látható a salétromsavas kémiai maratás után. Észrevehető, hogy az oxálsavas eljáráshoz hasonlóan ez az eljárás sem mutat ki sem nitridkiválást, sem fázishatárvastagodást a második minta hőhatásövezetében. Így ennek a vizsgálatnak a fényében is elfogadható a kettes minta.



46. ábra 3. minta salétromsavas elektrokémiai maratással kapott mikroszkópi felvétele

A hármas mintán sem nitridkiválások, sem fázishatárvastagodások nem lelhetőek fel. Ezek tekintetében különbözik az oxálsavas maratás eredményétől a mintánkra kapott eredmény ennél a maratásnál. Azonban hasonlóság, hogy mindkét eljárásnál elfogadható a minta.



47. ábra 4. minta salétromsavas elektrokémiai maratással kapott mikroszkópi felvétele

A negyedik mintán jellemzően nem található fázishatárvastagodás, és nitridkiválásból is nagyon csekély mennyiségű. Így ez a minta is elfogadható.

Összességében sikeresnek mondható ez a vizsgálat is, hiszen a kiválások és fázishatárvastagodások nem jelentősek a mintáimban, így mindegyik elfogadható.

3.3.6 Korróziós vizsgálat

3.3.6.1 Vizsgálat bemutatása

Elvégeztem a mintákon egy korróziós vizsgálatot is, mely a tömegvesztés alapján adja meg, hogy az adott darab megfelel-e. Ez az eljárást is az ASTM 1084 A szabvány alapján végeztem. Itt a vizsgálat elvégzéséhez fel kellett políroznom a mintákat, majd egy kikevert elegybe elhelyeznem őket 24 órára. A kikevert vegyület 55,1 g reagens vas (III) kloridot ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 6,6 g reagens nátrium-nitrátot (NaNO_3) és 600 ml desztillált vizet tartalmazott. Egész pontosan ennél többet kevertünk ki, ám ügyelve az arányok tartására. Ezután helyeztem el a mintákat egy üveg tárolóba 24 órára, mindegyiket külön, ügyelve, hogy egyezzen a tartókban lévő korrodáló folyadék mennyisége.



48. ábra A minták elhelyezve a korrodáló folyadékban

Fontos kiemelnem, hogy minimum 150 ml folyadékban kellett a mintáknak lennie szabvány szerint, valamint a minták mérete is meg volt határozva. Miután letelt a 24 óra, kivettem a mintákat, lemostam őket vízzel, tisztítottam őket acetonnal, majd egy ultrahangos rezegtetőbe helyeztem őket 15 percre, mely a korróziótermékeket volt hivatott eltávolítani a mintákról. Miután ez a folyamat befejeződött, ismét tisztítottam a mintákat acetonnal, majd egy hétvégén át hagytam őket száradni.



49. ábra A minták elhelyezve az ultrahangos rezegtetőbe

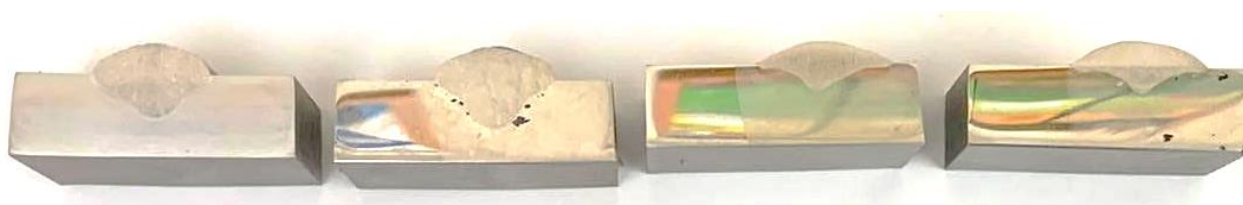
3.3.6.2 A vizsgálat eredménye és kiértékelése

Fontos megjegyezni, hogy mivel tömegvesztésen alapszik az eljárás, így rendkívül fontos volt lemérnem a darabok tömegét a vizsgálat előtt, majd a korróziós vizsgálat után is. Az így kapott tömegeket az alábbi táblázat tartalmazza:

Minta száma	1. minta (PMC Univ. tömör)	2. minta (PMC PCS tömör)	3. minta (PMC Univ. töltött)	4. minta (PMC PCS töltött)
Vizsg. előtt	61,0167 g	64,2818 g	59,8156 g	60,3439 g
Vizsg. után	61,0159 g	64,1869 g	59,8147 g	60,2138 g
Tömegvesztés	0,0008 g	0,0949 g	0,0009 g	0,1301 g

6. táblázat A minták tömege a korróziós vizsgálat előtt és után

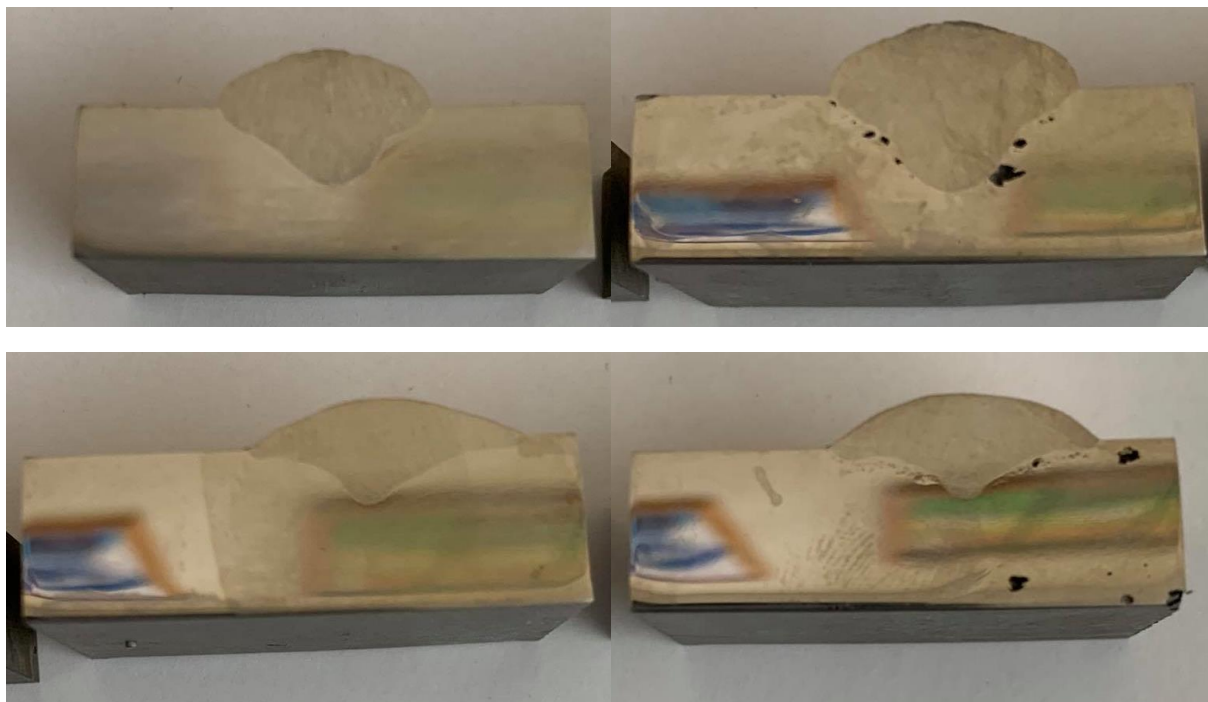
Jól látható, hogy az 1. és 3. minták tömege kevésbé csökkent, mint a 2. és 4. minták tömegei. Azonban kérdés van-e különbség a minták között ránézésre.



50. ábra A minták képei a korróziós vizsgálat után

Jól látható különbségek jelentkeznek a minták között. Először is, észrevehető, hogy az 1. és 3. mintákon szinte semmilyen korrózió nem vehető észre, míg a 2. és 4. mintákon jelentős lyukkorrózió lelhető fel. Azt is fontos megjegyezni, hogy bár a 4. minta teljes felületlen

megtalálhatóak a korrózió nyomai, mind a 2. mind a 4. mintán inkább a hőhatási övezetre jellemző a korrózió. A jobb láthatóságért nagyítva következnek az egyes minták képei:



51. ábra A minták korróziós vizsgálat utáni képei nagyítva

Ezt követően szükséges a minták kiértékelése korrózió szempontjából. Mint említettem, a vizsgálat tömegvesztésen alapul, így a következő képlettel tudom számolni, hogy megfelel-e az adott minta:

$$\text{Korróziósebesség} = \frac{\text{tömegcsökkenés [mg]}}{\text{minta felület [dm}^2\text{]} \cdot \text{idő [nap]}}$$

A képlet az ATSM A1084-es szabványban található, mely szabvány kimondja azt is, hogy korrózióálló acélok esetén a korróziósebesség maximálisan 10 lehet, ha ezt meghaladja egy adott minta értéke, akkor nem felel meg a szabványnak. Behelyettesítve az adott minták felületét, tömegcsökkenését és a mindegyik esetén azonos időt (1 nap) kapom az alábbi táblázatban látható eredményeket:

Minta száma	1. minta (PMC Univ. tömör)	2. minta (PMC PCS tömör)	3. minta (PMC Univ. töltött)	4. minta (PMC PCS töltött)
Korróziósebesség (mg/dm ² nap)	3,1	357,3	3,4	489,1

7. táblázat Az adott minták korróziós rátája

A táblázat egy felettébb érdekes tényre világít rá. Míg az 1. és 3. minták értékei bőven a megfelelő tartományba esnek, addig a második és 4. mintákra kapott értékek 35-50-szeres értékét adják a maximális értéknek. Így ezek a minták a korróziós vizsgálatok alapján nem felelnek meg.

Itt fontos végig gondolni mi okozhatja ezt a jelentős különbséget az elfogadható és nem elfogadható minták között. Mivel 1-1 tömör és töltött huzallal hegesztett minta is elfogadható, illetve nem elfogadható, így a huzal nem okozhatja ezt. Az áramerősség is névlegesen megegyezik, illetve a hegesztési sebességek is nagyjából azonosak, ezáltal ezek sem lehetnek a kiváltó okok. Összességében arra lehet következtetni, hogy a hegesztési eljárások okozzák a különbséget, mivel felfedezhető, hogy a PMC Universal eljárással készült 1. és 3. minták azok, amelyeket a korrózió kevésbé érintett, míg a PMC PCS eljárással készült 2. és 4. mintákat erőteljesen érintette. Azonban felmerül a kérdés, hogy mi lehet a különbség a kettő között, amikor mindkettő eljárásnál nagyjából egyeznek a hegesztési paraméterek, valamint a hőbevitel is. Erre az lehet a magyarázat, hogy a PMC PCS eljárásnál a gép által kiírt áramerősség érték egy átlagérték, valamint, hogy a különböző impulzusteknika miatt a termikus hatásfok is különböző a vizsgált eljárások esetén. Ezáltal a valódi hőbevitel is jóval nagyobb, mely olyan kiválásokat, hibákat okozhatott a szemcseszerkezetben, amelyeket az általunk elvégzett mérésekkel, eljárásokkal nem lehet kimutatni.

4. Összefoglalás és eredmények kiértékelése

4.1 Eredmények összefoglalása

A TDK dolgozat egy nagy hőbevitelű fedett ívű hegesztésre tervezett japánsovány duplex acél nagy hőbevitelű ívhegesztését és hegesztés utáni vizsgálatát mutatja be. A vizsgálat célja az volt, hogy alátámasszuk vagy cáfoljuk a gyártó által támasztott elvárásokat és állításokat, melyek szerint ebben az acélban nagy hőbevitel hatására sem alakulnak ki a felhasználás szempontjából káros intermetallikus vegyületek vagy más (nitrid) kiválások.

Ez az acél az NSSC 2120-as acél, melyet kifejezetten tengeri alkalmazásra fejlesztett ki a Nippon Stainless Steel Corporation. A hegesztést egy Yaskawa ívhegesztő robottal végeztem, két különböző hegesztési beállítással. Ezek a beállítások a PMC Universal, valamint a PMC PCS voltak. Ezen felül két különböző huzalt alkalmaztam, a 2209-es tömör duplex huzalt, valamint a 2307-es töltött huzalt. A hegesztéskor Cronigon 2-es kevert gázt alkalmaztam védőgázként.

Ezt követően a négy kapott varratot elemeztem. Először is a hegesztési paraméterek alapján, melyek nagyjából mind a négy esetben megegyeztek, így a hőbevitel is nagyon hasonló értéket adott mindegyik mintámra. Ezt követően a manuálisan mérhető méreteket (koronaszélesség, koronavastagság) mértem le tolómérő segítségével, valamint a varratok ferrittartalmát egy Fischer típusú ferritszkóppal.

Ezt követően daraboltam a varratokat, ügyelve arra, hogy jelentős hőhatás ne érje őket, ezzel esetlegesen fals eredményt adva a későbbiekben. A darabolt mintákat ezután beágyaztam, csiszoltam (P4000-es fokig) és políroztam (1 µm-es gyémánt szuszpenzióval), majd kémiai marattam. Ezzel párhuzamosan több másik darabot is vágtam a varratokból, melyeket úgyszintén csiszoltam és políroztam, ám a későbbi vizsgálatok igényei miatt nem ágyaztam őket be.

Először egy oxálsavas elektrokémiai maratást végeztem a mintákon mely a fázisokban kialakuló nitridkiválások és fázishatár vastagodások kimutatására alkalmas. Ehhez először szükség volt a marószer kikeveréséhez. A marószer 10 g reagens oxálsavból és ehhez kevert 100 ml desztillált vízből állt. A maratás részeként elkészítettem egy összeállítást, melyben a minta és egy a minta anyagával megegyező darab voltak a negatív, illetve pozitív pólusra kötve egy áramforráson, majd egy műanyag mintatartón behelyeztem őket egy üveg edénybe, amit megtöltöttem a marószerrel. Ezt követően bekapcsoltam az áramforrást, és a munkadarabot 5-7 V áramerősségen nagyjából 15-20 másodpercig a marószerben hagytam. Ezt követően a mintákat tisztítottam, majd mikroszkóppal vizsgáltam őket. Ezek a vizsgálatok kimutatták, hogy a mintákban minimális, a mérés alapjául szolgáló ASTM A 1084 szabvány szerint elfogadható mennyiségű nitridkiválás és fázishatárvastagodás fedezhető fel, így a minták megfelelnek. Érdekesség viszont, hogy a töltött (2304) huzalokkal hegesztett mintáknál némileg nagyobb mennyiségű kiválás volt felfedezhető.

Ezt követően a beágyazott mintákat kémiai marattam egy módosított Beraha marószerrel, mely 60 ml desztillált vizet, 30 ml sósavat és 0,75 g kálium-piroszulfidot ($K_2S_2O_5$) tartalmazott. Ez a kémiai maratás egy szulfidréteget helyez a minta felületére. Összességében a minták szövetszerkezetét hivatott kimutatni, ugyanis az ausztenit szemcséket világosítja, míg a ferrit szemcséket sötétíti. A kémiai maratás után a mikroszkópi képek segítségével megállapítottam az ausztenit valamint ferrit szemcsék méreteit, illetve bebizonyosodott hogy a ferritszkóppal

mért ferrittartalom nagyjából helyes volt, mivel hasonló arányok figyelhetők meg a mikroszkópi képeken is. Ennek tekintetében a kémiai maratás bemutatta, hogy mindkét huzaltípussal jól hegeszthető az alapanyag.

Harmadjára egy másik elektrokémiai maratást végeztem, mely a nitridkiválások mellett az intermetallikus vegyületek kimutatására is alkalmas. Ehhez egy másik marószert kellett kikevernem, mely az ASTM E 407-es szabvány alapján készült, és 60 ml salétromsav és 40 ml desztillált víz vegyülete. Az első elektrokémiai maratással megegyező elrendezésben 1-2 V feszültségre kapcsolva nagyjából 20 másodpercig hagytam a mintákat a marószerben. Ezt követően ezeket a mintákat is tisztítottam, majd mikroszkópi vizsgálatot végeztem rajtuk. Ezek a vizsgálatok nagyon hasonló eredményt adtak az első elektrokémiai vizsgálatokhoz, minimális nitridkiválások voltak megfigyelhetők, a töltött (2307) huzallal hegesztett mintáknál ebben az esetben is némileg nagyobb mennyiségben. Ennek ellenére ennél az eljárásnál is megfelelték a minták.

Ezt követte az utolsó eljárás, mely a korróziós vizsgálat volt. A korróziós vizsgálatot is az ASTM A 1084 szabvány alapján végeztem el. Ez alapján kikevertem egy korrodáló szert, mely 55,1 gramm reagens ferrit-kloridból ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 6,6 gramm reagens nátrium-nitrátból (NaNO_3) és 600 ml desztillált vízből áll. Fontos, hogy a vizsgálat megkezdése előtt le kellett mérnem a mintákat, mivel az eljárás kiértékelése a tömegvesztésen alapul. A mintákat egyenlő mennyiségű korrodáló szerbe kell elhelyezni 24 órára, polírozás után. Miután letelt a 24 óra, a darabokat kivettem, lemostam, majd egy ultrahangos rezegtetőbe helyeztem, melynek célja a mintákban maradt esetleges korróziós maradványok eltávolítása a mintákból. Ezt követően a mintákat ismét lemostam, majd szárítottam. A korrozív fürdő utáni mérlegelés után kiszámítottam a tömegvesztést, melynek ismeretében már kiszámolható volt a korróziós ráta. A szabvány szerint ennek a rátának az értéke maximum 10 lehet, mely alapján az 1. (PMC Univ. tömör huzal) és 3. (PMC Univ töltött huzal) minták megfelelték, ám a 2. (PMC PCS tömör huzal) és 4. (PMC PCS töltött huzal) nem. Mivel az alapanyag, a huzalok és a védőgáz tekintetében nincs különbség a hegesztési eljárások között, illetve a hegesztési paraméterek is nagyjából azonosak így maximum a hegesztési beállítások (Universal vagy PCS) lehetnek az okai a nagy különbségnek. Ez a PCS eljárásnál való esetleges nagyobb hőbevitellel magyarázható.

4.2 Eredmények kiértékelése, következtetések

Összességében jól szerepelt az acél a vizsgálatokon, mivel a gyártó állításával megegyezőleg minimális mennyiségű káros kiválás, illetve intermetallikus vegyület jött létre a fázisokban, ahogy ezt a két elektrokémiai maratásos eljárás is bizonyítja. A hegeszthetősége is megfelelő az anyagnak, ezt a kémiai maratáskor láthattuk. Azonban a korróziós vizsgálat eredménye nem egyértelműen pozitív, ugyanis az egyik hegesztési eljárással készített minták megbuktak a vizsgálatkor.

Érdekes lenne a jövőben tovább kutatni, hogy pontosan mi okozta a két nem elfogadható mintát a korróziós vizsgálatnál, illetve, hogy ez most csak egy egyedi eset, vagy ha nagyobb mennyiségű mintát készítünk és vizsgálunk, akkor is előfordul-e.

Valamint, ha lehetőség nyílik rá a jövőben, akkor egy további vizsgálat sorozat keretein belül mindenképp elvégzendő lenne egy Charpy ütővizsgálat is, amely úgyszintén az ASTM A 1084-

es szabvány egyik vizsgálata, azonban most a minták korlátozott méretei miatt nem nyílt alkalom az elvégzésére.

Összefoglalva a méréseket kimondható, hogy egyszerre biztosított egy aránylag átfogó képet a vizsgált acélminőségről, és biztosított egy jó alapot a további mérések és vizsgálatok elvégzéséhez, melyek még több eredménnyel tudják alátámasztani a gyártó beigazolódni látszó állításait, vagy a most felmerülő korróziós problémát, mely további problémákat fedhet fel.

5. Források, felhasznált irodalom

- [1] Statista, “Chart: How Maritime Emissions Compare To Cars In Europe.” 2020, [Online]. Available: <https://www.statista.com/chart/20243/co2-from-ships-vs-emissions-from-national-car-fleets/>.
- [2] “Empire State Building acélszerkezete.” [Online]. Available: https://www.google.hu/search?hl=hu&tbs=simg:CAQSlgIJJsaZJ4H-P04aigILELCMPwgaOgo4CAQSFOgCtBykJa8k0DKJJvUsyxLWCJkgGhoxLr-UdeCVPxIGT_1NB3gtByvd8wjUUGIGuqiAFMAQMCxCORv4IGgoKCAgBEgR2zAw6DAsQne3BCRqqAQodCgppcm9ud29ya2Vy2qWI9gMLCgkvbS8wNjVibjEKJQoS Ymx1ZS1jb2xsYX.
- [3] J. Chater, “Running a tight ship: Stainless steel can be cost-effective for the construction of ships and boats,” [Online]. Available: www.stainless-steel-world.net.
- [4] J. Dobránszky, *Anyag-és technológiaismeret műszaki menedzsereknek*. Budapest, 2015.
- [5] “Ferrites korrózióálló acéből készült motoralkatrészek.” [Online]. Available: https://www.google.hu/search?sa=G&hl=hu&tbs=simg:CAQS_1gEJhbfIYPSI5f0a8gE LELCMpwgaOgo4CAQSFIM3qTO0B5QO6D-5L-gM8xWAOOkuGhqlMgULuXxb9gt_1icw6bNd-7WZ6n6XLKJX-pyAFMAQMCxCORv4IGgoKCAgBEgTvWh1wDAsQne3BCRqSAQoaCgdjaG9wcG Vy2qWI9gMLCgkvbS8wMzYydjUKGwoHY3J1aXNlctql.
- [6] “Martenzites korrózióálló acélból készült orvosi és sebészeti eszközök.” [Online]. Available: https://www.mediker.net/index.php?link=shop%2Fshop.php&topic=description&product_id=3221&topic_id=307.
- [7] “Ausztenites korrózióálló acélból készült szobor Chicagóban.” [Online]. Available: <https://www.metrosteel.com.au/austenitic-steel-exactly-whats-used/austenitic-stainless-steel/>.
- [8] “Duplex acélból készült vegyianyagszállító hajó.” [Online]. Available: https://www.google.hu/search?sa=G&hl=hu&tbs=simg:CAQSpwIJTuYEQsacKv0amw ILELCMPwgaOgo4CAQSFL8NgjLWKbUm7QuAAtlqgn2EZoHGhq9mxknS6uNx-Wdg5k6KhCk-kQmNF2UFVs7kiAFMAQMCxCORv4IGgoKCAgBEgRbP2D_1DAsQne3BCRq7AQojChFmcmVpZ2h0IHRyYW5zcG9ydNqliPYDCgoIL20vMDcwcW0KJwoTb.
- [9] B. Karoly, “Dr. Bodok Karoly ; ,” 1997.
- [10] A. M. Guillet, L B; Portevin, “A korszerű korrózióálló acélok , azok alkalmazhatósága és hegeszthetősége.”
- [11] B. C. Kovach, “Safer seas with stainless steel By Curtis Kovach , editor , MolyReview Rules and classification of chemical tankers The cargo tank Design and construction ;,” pp. 2019–2022, 2021.
- [12] C. Ships, “Chemical Tanker First to Use New Duplex Stainless Steel Cargo Tanks,” pp. 1–3, 2021.
- [13] A. S. M. International, A. S. M. Store, and A. S. M. Foundation, “Sandvik super-duplex stainless steel selected for prototype boat,” pp. 1–3, 2021.

- [14] F. Video, “Stainless Steel Tankships a First in Japan,” pp. 1–7, 2021.
- [15] Y. OIKAWA, S. TSUGE, and F. GOHNAME, “Development of New Lean Duplex Stainless Steel Series NSSC 2120TM, NSSCTM 2351,” *Nippon Steel Tech. Rep.*, vol. 126, no. 126, pp. 22–27, 2021, [Online]. Available: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/no126.html%0Ahttps://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/126-04.pdf>.
- [16] I. Ferric and C. Corrosion, “Standard Test Method for Detecting Detrimental Phases in Lean Duplex Austenitic / Ferritic Stainless Steels 1 EVALUATION OF THE PRESENCE OF TEST FOR DETERMINATION OF THE PRESENCE,” pp. 1–17, 2014, doi: 10.1520/A1084.