



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BREZNAY CSABA

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

A hidrogén ridegítő hatása duplex korrózióálló acélok hegesztett kötéseiben

Konzulens(ek):

dr. Katula Levente Tamás
egyetemi docens

dr. Varbai Balázs
adjunktus

Budapest, 2021.

Szerzői jog © Breznay Csaba, 2021.

NYILATKOZATOK

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen TDK dolgozat az intézmény által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Kelt, Budapest, 2021. november 8.

A tanszék részéről:

tanszéki konzulens

Elfogadási nyilatkozat

Ezen TDK dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2021. november 8.

konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Breznay Csaba* (FSRHNC), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK 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. november 8.

hallgató

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás	ix
1. Bevezetés	1
2. Duplex acélok és azok hegeszthetősége	3
2.1. Sovány duplex acélok	3
3. Hidegrepedés	7
3.1. Bevonat nedvességének hatása a diffúzióképes hidrogéntartalomra . . .	10
3.2. A hidrogén indukálta repedés(HIC) folyamata	12
3.2.1. A hidrogén diffúziója	13
3.3. Hidrogén oldhatósága	16
3.4. Duplex acélok hidegrepedése	17
3.5. Tekken-próba	19
3.6. Élsarokvarratos (CTS-próba) vizsgálat	20
4. Az ívhegesztés alapjainak általános bemutatása	23
4.1. (111) Kézi ívhegesztés	24
4.1.1. A bevonat feladata	24
4.1.2. Bázikus bevonat	25
4.1.3. Cellulóz bevonat	26
4.1.4. Rutilos bevonat	26
4.1.5. Rutil-bázikus bevonat	27
4.1.6. Technológiai paraméterek	27
5. Kísérleti terv	29

5.1. Kísérleti paraméterek	29
5.1.1. Elektroda felvett nedvessége	30
5.1.2. Felület	31
5.1.3. Hőbevitel	31
5.2. Rögzítővarratok hegesztése	32
5.3. Vizsgálandó varratok hegesztése	33
5.4. CTS-próbatestek	34
5.4.1. Roncsolásmentes vizsgálatok	35
5.4.2. Minták darabolása	37
5.5. Csiszolatok	38
5.6. Csiszolatok kiértékelése	38
5.6.1. P1-t1 varrat kiértékelése	39
5.6.2. P2-t2 varrat kiértékelése	40
5.6.3. P3-t1 varrat kiértékelése	41
5.6.4. P3-t2 varrat kiértékelése	41
5.6.5. Beolvadási mélységek	43
5.6.6. Keménységmérés	44
5.6.7. Csiszolatok vizsgálatának eredményei	44
6. Összefoglalás	47
6.1. Eredmények	47
6.1.1. Duplex acélok hidegrepedési érzékenysége	47
6.1.2. Porozitás	47
6.2. Kitekintés	48
Irodalomjegyzék	49
Mellékletek	i

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni konzulenseimnek, *Dr. Varbai Balázsnak* és *Dr. Katula Levente Tamásnak*, kiknek készséges segítsége, gondozása nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

Köszönet illeti az Anyagtudomány és Technológia Tanszék hegesztőjét, *Simon Gergelyt* akinek gyakorlati szakértelme és segítsége nélkül nem készülhetett volna el ez a dolgozat.

A méréshez és kiértékeléshez szükséges berendezéseket az Anyagtudomány és Technológia Tanszék bocsátotta rendelkezésemre, melyek használatában *Kuktáné László Ágnes* laboráns volt segítségemre, amit ezúton is köszönök.

Budapest, 2021. november 7.

Breznay Csaba

1. fejezet

Bevezetés

A duplex korrózióálló acélok 1980-as évek közepére tehető megjelenése óta igen elterjedt alapanyaggá vált a különböző ipari alkalmazás terén, ilyenek például a hajóipar, olajipar, atomipar, autóipar, offshore acélszerkezetek, hőcserélők gyártása. Alkalmazásuk oka a kiváló korrózióállóságuk és jó mechanikai tulajdonságaik, folyáshatáruk ≈ 500 MPa.

Felhasználásukból eredően nem ritka, hogy helyszínen kell hegeszteni, kézi ívhegesztést (MSZ EN ISO 4063 szerint 111-es eljárás) alkalmazva. Helyszíni hegesztés során gyakorta nem biztosíthatók az optimális körülmények a varrat elkészítéséhez. Nincs lehetőség az alapanyag előmelegítésére, nem biztosított az elektróda kiszárítása és az időjárást sem tudjuk befolyásolni, a javítást, karbantartást pedig el kell végezni. Ilyen körülmények közt elkerülhetetlenül számolnunk kell a hidrogén hatásával.



1.1. ábra. Helyszíni hegesztés extrém körülmények közt¹

¹Forrás: <https://cdiver.net/news/underwater-welder-job-description-and-requirements/>

A hidrogén hatására zárványok, porozitások jelenhetnek meg, rosszabb esetben hidegrepedés következhet be. Hidegrepedés szempontjából döntő fontosságú a hűlés során kialakuló szövetszerkezetek aránya, tehát a hegesztés során fokozott figyelmet kell szánni a megfelelő hőbevitelre, a hegesztőanyag és az alapanyag állapotára. Azokra a tulajdonságokra is nagy hatással van a kialakuló szövetszerkezetek aránya, amik miatt előszeretettel alkalmazzuk a duplex korrózióálló acélokat. Ilyen tulajdonságok a korrózióállóság és a mechanikai tulajdonságok. Hegesztésük során nem csak a hidrogén okozhat elridegédést, hanem a különböző intermetallikus fázisok kiválása is.

A hegesztett varratoknak az átvételi szinteknek megfelelő minőségűnek kell lenniük. Az MSZ EN ISO 5817:2014 szabvány három különböző minőségi szintet különböztet meg, ezek rendre *D,C,B*, ahol a *B* minőségi szint a hegesztett kötésekkel szembeni legszigorúbb követelmény. Közös mindhárom minőségi szintben, hogy a repedéseket (MSZ EN ISO 6520-1:2008 szerinti kódszám: 100) egyikük sem engedi meg.

További követelmény, hogy a varrat megfelelő mechanikai és korróziós tulajdonságokkal rendelkezzen, a hosszú élettartamot biztosítva. Korrózióálló acélok esetén igen sokféle fizikai és környezeti hatásoknak lehetnek kitéve. Ebből kifolyólag kiemelt fontosságú a varrat és annak hőhatásövezetének mechanikai és korróziós tulajdonságainak megőrzése, biztosítása.

Jelenleg igen limitált mennyiségű szakirodalom foglalkozik a duplex korrózióálló acélok hidegrepedésével. Dolgozatom célja a hidrogén ridegítő hatásának vizsgálata duplex korrózióálló acélok *111-es eljárással* való hegesztése során. Céлом a szakirodalmi forrásokban közzétett megállapítások saját kísérletekkel történő megerősítése, valamint azokon túllépve új mérési eredmények bemutatása.

Dolgozatom *második fejezetében* áttekintem a duplex korrózióálló acélokat és azok hegeszthetőségét. A *harmadik fejezet* átfogó szakirodalmi áttekintést tartalmaz a hidegrepedésről és annak folyamatáról. A *negyedik fejezetben* a korábban említett kézi ívhegesztés alapjait tekintem át. Az *ötödik fejezetben* megfogalmazom a kísérleti tervemet, majd kiértekelem azt.

2. fejezet

Duplex acélok és azok hegeszthetősége

A duplex acélok első említése az 1920-as évekre tehető, kereskedelmi megjelenése pedig az 1930-as évek elejére. Elnevezése a latin *duplex* szóból ered, melynek jelentése *kettős*. Az elnevezés találó leírása az acél szerkezetének, ami elvileg 50 – 50 százalékban tartalmaz ausztenitet (γ) és ferritet (δ). A ferrites-ausztenites szövetszerkezet előnye az acél szilárdságának jelentős növekedése, valamint a kloridos környezetben kiemelkedő lyukkorróziós ellenállás.

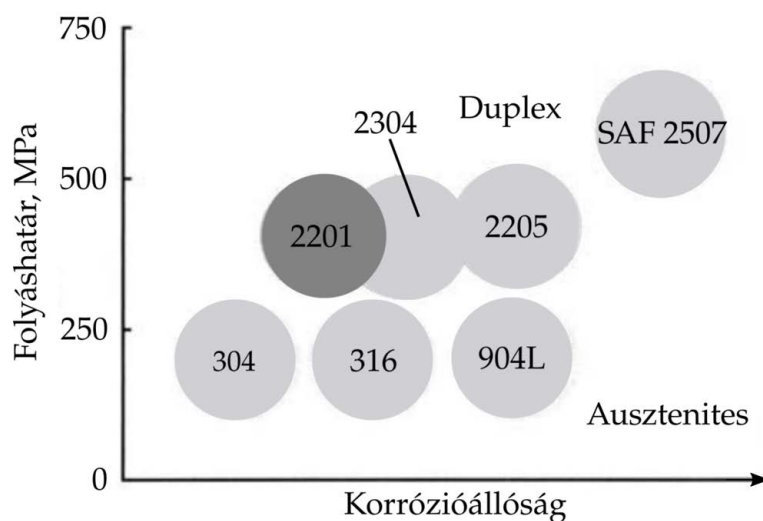
Az 1970-es években további fejlesztéseknek köszönhetően megjelent a duplex acélok második generációja, nagyobb N-tartalommal, főként a lyukkorróziós ellenállás javítása és a szilárdság növelése érdekében. A nitrogénnel való ötvözés megakadályozza a teljes hőhatásövezet feritté alakulását hegesztés után. Továbbá a nitrogén megnövelte az acél szilárdságát és javította a korrózióállóságát.

A duplex acélok negyedik generációja, a szuperduplex acélok az 1970-es évek második felében az offshore felhasználás fellendülésének okán jöttek létre. Ezek az acélok nagyobb ötvözőtartalommal és jobb mechanikai és korróziós tulajdonságokkal rendelkeznek. Szuperduplex az acél, ha annak pitting indexe legalább 40 ($PRE \geq 40$). Természetesen ez a nagyobb ötvözőtartalom az acél árának növekedését is jelentette, de még mindig versenyképes maradt a hasonló tulajdonságokkal rendelkező ausztenites korrózióálló acélokhöz képest (2.1. ábra). [1]

2.1. Sovány duplex acélok

A sovány duplex acélok fejlesztése az 1980-as évek közepén indult, azonban egészen a 2000-es évek elejéig tartott. Ellenben a szuperduplex acélokkal, a sovány duplex acélok kifejlesztésének oka a költségcsökkentés volt. A legnagyobb problémát a nikkel árának változása jelentette. A nikkel és molibdén mennyiségének csökkentésével az acél árát stabilan lehetett tartani. A kisebb nikkel tartalmuk ellensúlyozásaként nagyobb mennyiségű mangánnal és nitrogénnel ötvözik ezeket az acélokat. A költségcsökkentés ellenére

szilárdságuk és korrózióállóságuk ugyan úgy versenyképes a hasonló felhasználási területű ausztenites korrózióálló acélokkal. [1]



2.1. ábra. Ausztenites és duplex acélok korróziós és mechanikai tulajdonságai [2]

Tekintsük át a következőkben egy sovány duplex acél (1.4162) kémiai összetételét:

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
1.4162	0,04	6	1	0,04	0,015	1,7	22	0,8	0,8

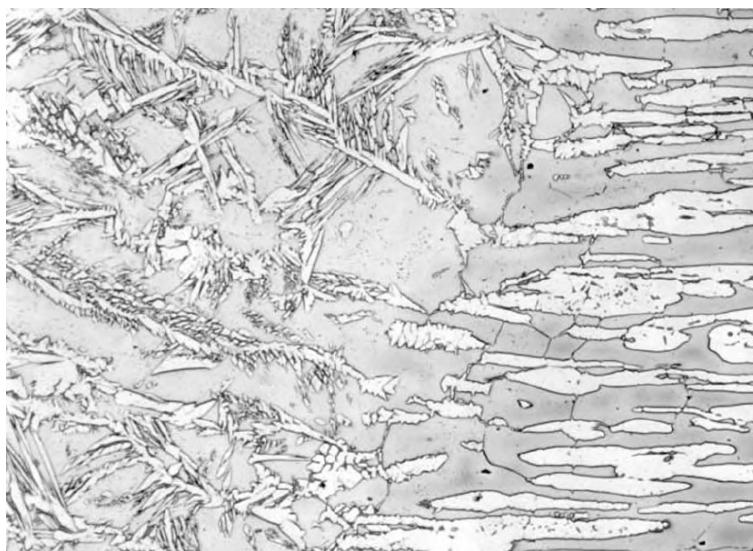
2.1. táblázat. 1.4162 kémiai összetétele (maximális megengedett értékek) (wt%) [3]

A kis széntartalom a korrózióállóság javítása miatt indokolt, duplex acélok esetén a szén szennyezőnek minősül [4]. Minél nagyobb mennyiségű ferritképző ötvözőt tartalmaz az acélunk, annál inkább hajlamossá válik a kiválásokra. Amennyiben 0,04 tömegszázaléknál nagyobb széntartalommal rendelkezne az acélunk, a nagy krómtartalom miatt problémát jelentene a krómkarbidkiválás, ezért a duplex acélok széntartalmát 0,04 tömegszázalék alatt tartják.

A nagymértékű krómötvözésnek a célja a korrózióállóság növelése. Az acél felületén képződő zömében Cr_2O_3 króm-oxid egy passzív réteget képezve adja az anyagunk korrózióállóságát. A nikkellel való ötvözés célja a szívósság növelése, a nitrogén növeli a lyukkorróziós ellenállást és a szilárdságot.

A ötvözők közül a szén, nikkel, nitrogén, mangán és réz *ausztenitképzők*, míg a króm, molibdén valamint a volfrám *ferritképzők*. Az acél gyártása során a kívánt ausztenit-ferrit arány eléréséhez meghatározott ötvözőmennyiség és hőkezelés párosul. Hegesztés során azonban nem minden esetben tudjuk ilyen jól befolyásolni a körülményeket.

A gyors hűlés hatására nagyobb mennyiségű ferrites szövetszerkezet alakulhat ki, nincs ideje az ausztenit kialakulásának. Ennek ellensúlyozásaként a hegesztőanyagok általában nikkellel túlvöztöttek, valamint nitrogént is tartalmaznak. A két szövetelem



2.2. ábra. Varrat-alapanyag átmenet 1.4462 duplex acél esetén [5]

közül az ausztenit biztosítja az acél jó alakíthatóságát, szívósságát, jó hegeszthetőségét és a *hidegrepedéssel szembeni ellenállását*, míg a ferrit adja a megfelelő korrózióállóságot főleg a kloridos környezetben való lyukkorróziós ellenállást, a réskorrózióval szembeni ellenállást és a feszültségkorrózióval szembeni ellenállást. Tehát ha ettől az ideális esetben 50-50%-os ausztenit-ferrit aránytól lényegesen eltérünk, akkor a tulajdonságok számottevő változásával kell számolnunk [4].

A hegesztés során tehát kiemelt fontosságú a megfelelő hőbevitel, a megfelelő szövetszerkezet eléréséhez. A két fázis létrejötte eltérő módokon mehet végbe [6]. Az erősen ötvözött acélok megszilárdulásának módja azok kémiai összetételétől függ. A következő termodinamikára alapuló matematikai modell segítségével meghatározhatjuk az elsődleges kristályosodás módját [6]:

$$\phi = \text{Ni}_{\text{eq}} - 0,75 \cdot \text{Cr}_{\text{eq}} + 0,257$$

ahol

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \text{Ni} + 0,31 \cdot \text{Mn} + 22 \cdot \text{C} + 14,2 \cdot \text{N} + \text{Cu}$$

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \text{Cr} + 1,37 \cdot \text{Mo} + 1,5 \cdot \text{Si} + 2 \cdot \text{Nb} + 3 \cdot \text{Ti}$$

a kristályosodás a következők szerint játszódik:

$\phi \ll 0$: ferrites kristályosodás

$\phi \gg 0$: ausztenites kristályosodás

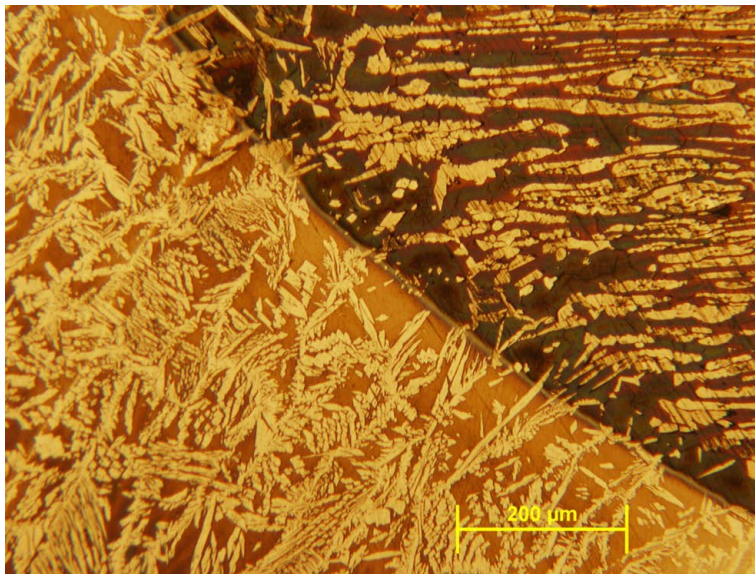
$\phi \approx 0$: ferrites-ausztenites kristályosodás

Egy duplex acélok hegesztéséhez tipikusan felhasznált elektróda (pl. E2209) $\phi = -8.2$ értékkel rendelkezik. 1.4162 duplex acél esetén ez a ϕ érték $\phi = -12,95$, tehát az alapanyag kezdetben teljesen ferritesen kristályosodik, majd csak utána kezdődik

az ausztenit szemcsék növekedése. Az ausztenit szemcseközi allotróp átalakulásként, valamint Wildmannstätteni oldallemezek vagy szemcsék közti lemezek formájában alakulhat ki, függően a lehűlés sebességétől [4]. Duplex acélok varratfémének ferrittartalma általában 30-70% közötti, a kémiai összetételtől és lehűlési sebességtől függően.

A gyors hűlés során a ferrit nitrogénnel túltelítetté válik. Hegesztésük során a 700 – 900 °C-os hőmérsékleten való huzamosabb tartózkodás elkerülendő, a Cr₂N króm-nitrid valamint σ -fázis kiválások miatt. A kiválások mennyisége csökkenthető az ausztenittartalom növelésével, ami ausztenitképzők (Ni,N) ötvözésével érhető el.

Duplex acélok hőhatásövezetében az tisztán ferrites tartományba való hevülést követő gyors hűlés miatt az alapanyagénál nagyobb a ferrittartalom (2.3. ábra), jellemzően nagyobb mennyiségű intermetallikus vegyületek kiválásával [4].



2.3. ábra. Nagy ferrittartalom a hőhatásövezetben (1.4162 alapanyag és 1.4462 varratfém, hőbevitel=0,79 kJ/mm)

Előmelegítésre általában nincs szükség, sok esetben nem is engedélyezett, legfeljebb nagy falvastagságok esetén, amely esetben az előmelegítés hőmérséklete ≈ 150 °C. Többretegű varratok készítése során a rétegközi hőmérséklet maximális értéke 150 °C lehet [4].

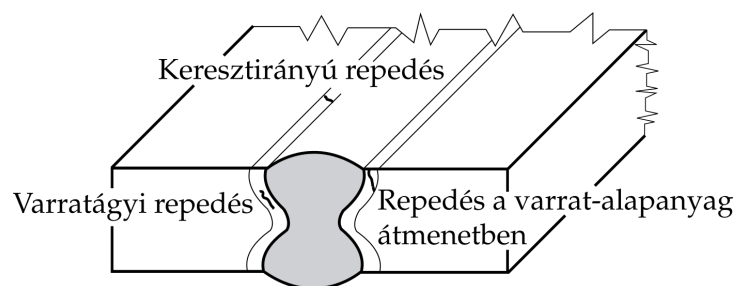
3. fejezet

Hidegrepedés

A hidrogén ridegítő hatása régóta ismert probléma acélok hegesztésekor. Jelenléte repedéseket, zárványokat, elridegedést okozhat. Problémát jelent, hogy a repedés gyakran csak a hegesztés után, néhány órával később jelentkezik, ezért észlelése nehézkes. Ennek oka, hogy az atomos hidrogénnek időre van szüksége a „megfelelő” anyagrészekbe való diffundáláshoz, ahol repesztő hatást fejthet ki. A hidegrepedés létrejöttének feltételei a következők: [7]

- elegendő diffúzióképes hidrogénatom (H_D) jelenléte,
- kellő nagyságú húzófeszültségek a varrat környezetében,
- érzékeny, rideg szövetszerkezet
- általánosságban $-100 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklettartomány

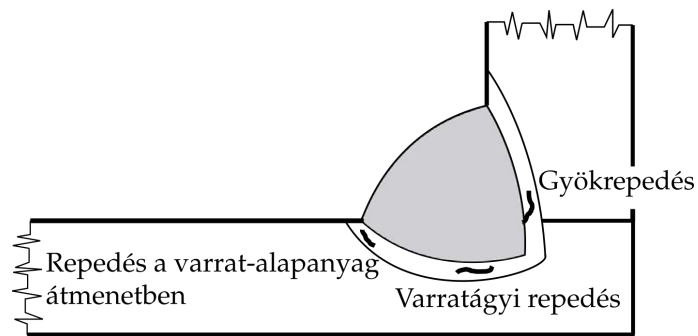
Ezen feltételek közül a húzó maradó feszültségek és a hőmérséklet kiküszöbölése a hegesztési folyamat során lehetetlen. A hegesztés utolsó szakaszában ($< 150 \text{ }^\circ\text{C}$) vagy a lehűlést követően megy végbe a hidegrepedés. Ezért a hidrogén mennyiségének szabályozására, valamint a számunkra kedvező szövetszerkezet kialakulására kell koncentrálnunk. [7]



3.1. ábra. Hidegrepedés a hőhatásövezetben tompavarrat esetén [7]

Hegesztett varratok hőhatásövezetében a repedések általában a varratágyban, a varrat-alapanyag átmenetben, vagy felszín alatti (hossz- vagy keresztirányú) repedések

formájában jelennek meg (3.1-3.2. ábrák). A repedések hossza néhány mikrométertől néhány milliméterig terjed.

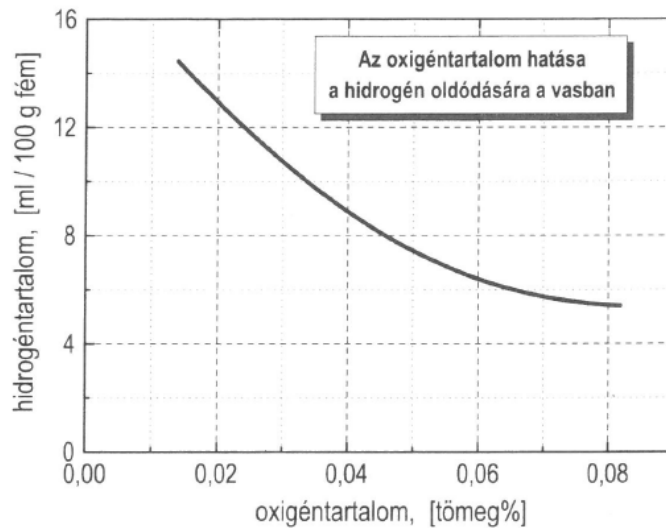


3.2. ábra. Hidegrepedés a hőhatásövezetben sarokvarrat esetén [7]

Hossz- vagy keresztirányú hidegrepedés kialakulhat a varratfémbe is többsoros varrat esetén, ha a ráépülő sornak az előtte lévő varrat lesz a hőhatásövezete. Keresztirányban lehetnek a varratfém tengelyére merőlegesek, vagy azzal szöget bezáróak (tipikusan 45°). Elhelyezkedésüket tekintve lehetnek felszínre nem kijutó, vagy felületre kifutó repedések. [7]

Alapvetően két fajta hidrogéntartalomról beszélhetünk, maradó hidrogéntartalomról, ami a varratfémbe oldódik és nem okoz hidegrepedést, valamint diffúzióképes hidrogéntartalomról (H_D) ami a hidegrepedésért felelős. Hegesztés során a hegfürdő az ív környezetéből, hidrogén tartalmú védőgáz használata esetén az ívplazmából veszi fel a hidrogént. A nagy hőmérsékletű ($\approx 10000^\circ\text{C}$) ívplazma ionokra bontja a molekulákat az ívoszlopban. [8] Az így megjelenő atomos állapotú hidrogén diffúziós sebessége nagyságrendekkel nagyobb, mint az egyéb ötvöző illetve szennyező anyagoké. [4]

A lokális hőbevitel és a gyors hűlés miatt hőtágulás és zsugorodás lép fel, ami húzófeszültséget okoz. A feszültség a gyökoldalon és a varratátmenetnél lévő zárványoknál koncentrálódik, amely feszültséget kiegészíthetik külső, hegesztés utáni terhelések. A feszültség nagysága függ a hőbeviteltől, varratgeometriától, az alapanyag és a varratfém folyáshatárától valamint a külső kényszerektől. [8] Hűlés során a maradó feszültség nő, az acél hidrogénoldó képessége folyamatosan csökken, a hidrogén egy része diffúzió útján távozik, azonban egy részének a hűlés gyorsasága miatt nincs ideje kidiffundálni, így az a varratfémbe és annak hőhatásövezetében marad. A diffúzió mértéke függ az alapanyag és a hegesztőanyag kezdeti hidrogéntartalmától, a varrat méretétől, a hegfürdő oxigéntartalmától, valamint a hűtés sebességétől. A hegfürdő oxigéntartalmát a bevont elektróda kiválasztásával befolyásolhatjuk. A 3.3. ábrán látható, hogy minél jobban dezoxidált a hegfürdő, annál nagyobb a hidrogénoldó képessége. [4]



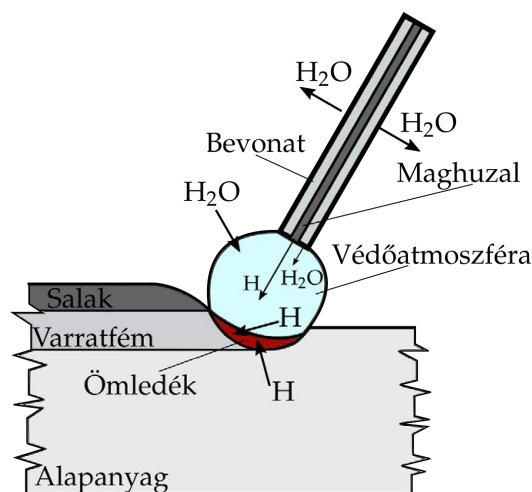
3.3. ábra. Az oxigéntartalom hatása a hidrogénoldó képességre [4]

A hidrogén forrása hegesztőanyag oldalról (3.4. ábra):

- Nedvesség a bevont elektróda felületén, vagy a portöltetben, fedőporban,
- A bevonat hidrogéntartalma,
- Olaj, zsír vagy egyéb szennyezés jelenléte a hegesztőanyag felületén,
- Oxidok jelenléte a hegesztőanyag felületén, pl. rozsda

A hidrogén forrása az alapanyag oldalról:

- Olaj, zsír vagy egyéb szennyezés jelenléte az alapanyagon, a varrat környezetében,
- A hegesztendő felület előkészítésére szolgáló különböző összetételű zsírtalanító anyagok
- Az alapanyag hidrogéntartalma



3.4. ábra. A hidrogén forrásai [9]

A 3.5. ábrán láthatjuk a különböző eljárásokkal készült varratok hidrogéntartalmát. Mind a hegesztési eljárásnak, mind a hegesztőanyagnak hatása van a hidrogéntartalomra. A 10 ml/100g varratfém határnál kisebb esetben a hegesztés során a hidegrepedés valószínűsége kicsi, kivéve ha a varratfém vagy a hőhatásövezet keménysége a kritikus értéknél nagyobb.

A 20 ml/100g varratfém határnál nagyobb eljárások során a hidegrepedés elkerülése komoly feladatot jelent. A legnagyobb hidrogéntartalommal rendelkező eljárás a kézi ívhegesztés, a bevonat nedvesség felvevő képessége miatt. Különösen problémás a hegesztés rutilos elektródák (pl. E6010 valamint E7010) használatával, a bevonatból termelődő jelentős mennyiségű hidrogén miatt. Kedvező eljárás a huzalelektródás védőgázos ívhegesztés a kis hidrogéntartalma miatt.

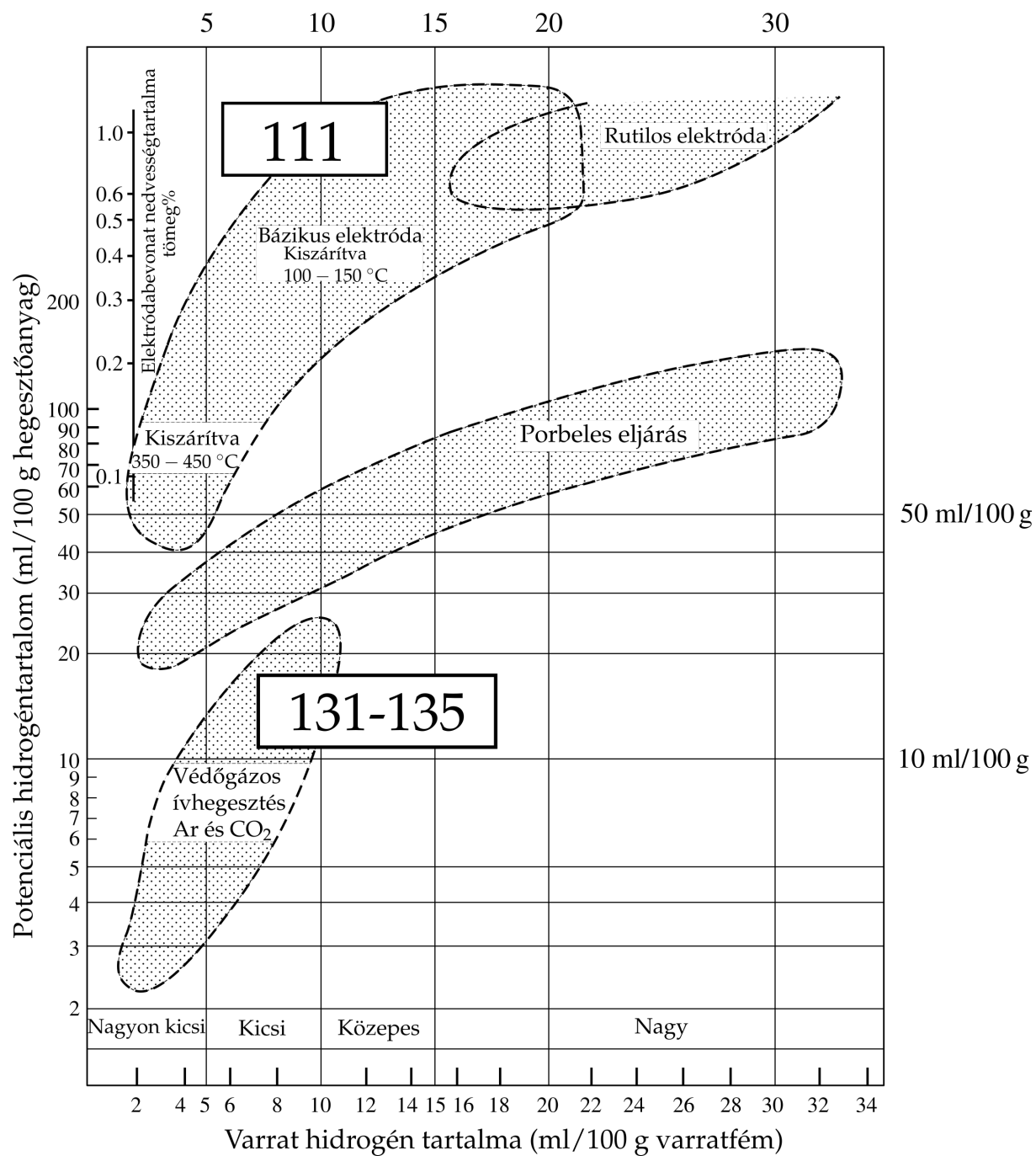
3.1. Bevonat nedvességének hatása a diffúzióképes hidrogéntartalomra

Fydrych és Łabanowski [10] vizsgálták a különböző mértékben nedvesített elektródák diffúzióképes hidrogéntartalmát. A méréseikből (3.1. táblázat) jól látható, hogy a bevonat nedvessége milyen mértékben növeli a diffúzióképes hidrogéntartalmat.

#	Elektróda megnevezése	Elektróda állapota	Diffúzióképes hidrogéntartalom
1	ER2.46	Száraz	29,32 ml/100 g
2	ER2.46	5 percig nedvesített	41,45 ml/100 g
3	ER2.46	10 percig nedvesített	42,08 ml/100 g
4	ER2.46	30 percig nedvesített	47,37 ml/100 g
5	ER2.46	12 óráig nedvesített	58,71 ml/100 g
6	ER2.46	Víz alatt	39,16 ml/100 g
7	ER1.46	Száraz	32,34 ml/100 g
8	EA1.46	Száraz	59,10 ml/100 g
9	OK75.75	Száraz	4,40 ml/100 g
10	OK75.75	7 óráig nedvesített	6,16 ml/100 g
11	OK75.75	14 óráig nedvesített	12,73 ml/100 g
12	OK48.08	Száraz	1,66 ml/100 g
13	OK48.08	7 óráig nedvesített	7,46 ml/100 g
14	OK48.08	14 óráig nedvesített	12,19 ml/100 g
15	EB1.46	Száraz	2,29 ml/100 g
16	EB1.46	7 óráig nedvesített	7,30 ml/100 g
17	EB1.46	14 óráig nedvesített	23,39 ml/100 g

3.1. táblázat. Nedvesség hatása a diffúzióképes hidrogéntartalomra (Fydrych és Łabanowski nyomán) [10]

A nedvesítést 95 % relatív páratartalom és 50 °C mellett végezték. Kutatásukat alapul véve fogom vizsgálni a különböző mértékben nedvesített elektródák hidrogéntartalmának hatását a hegesztett varratok repedésérzékenységére.



3.5. ábra. Különböző eljárások hidrogéntartalma [11]

3.2. A hidrogén indukálta repedés(HIC) folyamata

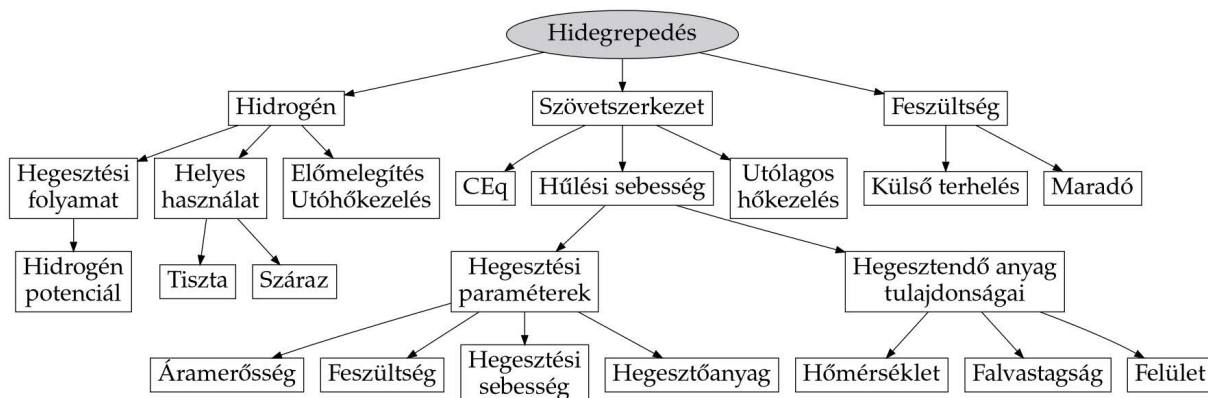
A hidrogén okozta hidegrepedés leírására több modell is létezik, azonban egyikük sem magyarázza meg teljes egészében a jelenséget, általánosan elfogadott mechanizmus nem létezik. A hidegrepedés folyamatát az alábbiak szerint foglalhatjuk össze: [8]

1. Az ívplazma környezetében lévő nedvesség hidrogén molekulára, hidrogén atomokra és hidrogén ionokra bomlik szét, melyek a hegfürdőbe oldódnak.
2. A hegfürdő hűlése és dermedése során hidrogénnel túltelítetté válik.
3. A túltelített hidrogén hajlamos a hőhatásövezetbe diffundálni.

Amennyiben a hőhatásövezet ausztenites, a hidrogén oda fog diffundálni, ugyanis az ausztenit hidrogénoldó képessége nagyobb.

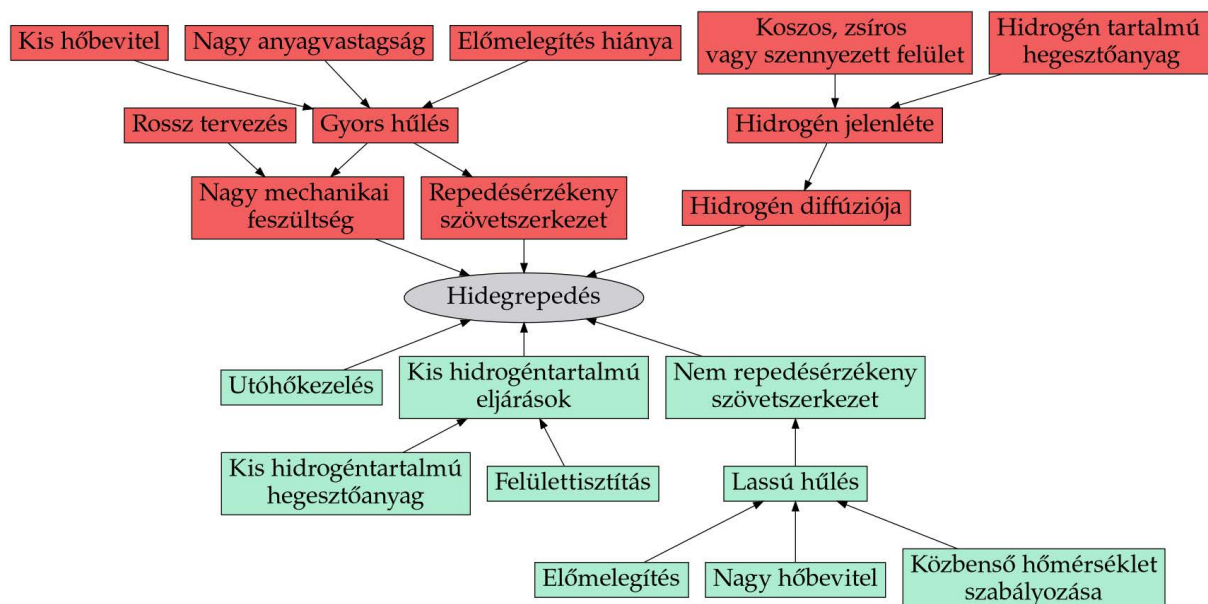
4. A gyors hűlés során az ausztenit bénitté vagy martenzitté alakul, az ausztenitben korábban oldott hidrogén ezekben az újonnan kialakult szövetszerkezetekben fog maradni.
5. Az ausztenites majd bénites illetve martenzites átalakulással járó térfogatváltozás, a külső kényszerek és terhelések okozta maradó feszültség a hidrogénnel kiegészítve repedés méretűvé növelik a rácshibákat.
6. A repedés tovább nő, miközben a hidrogén koncentrálódik.
7. A repedés terjedésével annak csúcsa „előre” halad, a hidrogén tovább diffundál a repedés csúcsa felé.

Összefoglalva a hidegrepedést befolyásoló tényezőket a következő folyamatábrán (3.6. ábra) szemléltetem:



3.6. ábra. A hidegrepedést befolyásoló tényezők [8]

A hidegrepedéshez vezető okokat, valamint a lehetséges megoldásokat a technológiai oldalról a 3.7. ábra mutatja.



3.7. ábra. A hidegrepedés technológiai okai (piros) és lehetséges megoldásai (zöld) [12]

3.2.1. A hidrogén diffúziója

A hidrogén diffúziója hibamentes rácsszerkezet esetén matematikailag leírható Fick II. törvényének segítségével: [8]

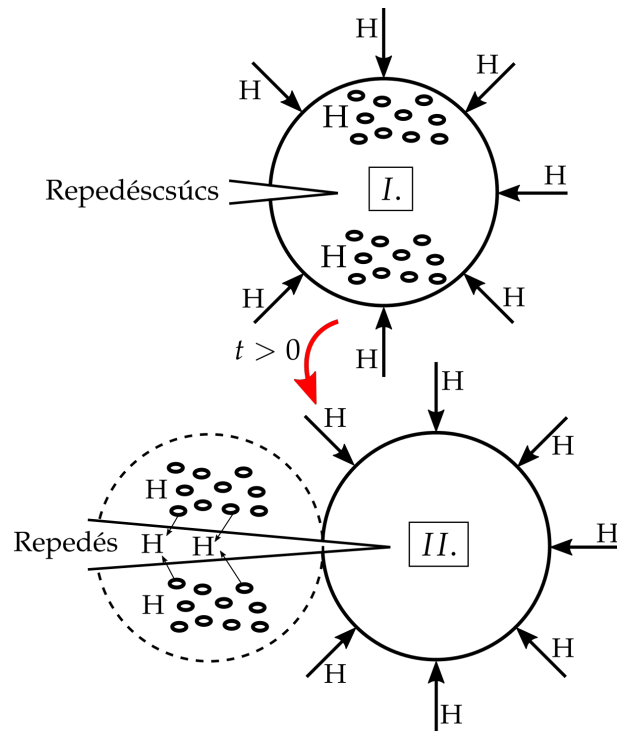
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 C \quad (3.1)$$

Ahol:

- C az acélban diffundáló hidrogén koncentrációja,
- $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ Laplace-operátor,
- D a hidrogén diffúziós állandója

Valós varratban azonban a hibahelyek miatt kialakuló úgynevezett hidrogén csapdákból lelassul a hidrogén diffúziója. Hidrogén csapdának nevezzük a hidrogénnek a fémekben lévő különböző hibahelyekkel való kölcsönhatását. Ezek a hibahelyek lehetnek ponthibák, diszlokációk vagy szemcsehatárok. A hidrogén csapdához érve a diffundáló hidrogénatom elektronját „visszaszerezve”, hidrogénként kötődik ahhoz. A diffundáló hidrogénionok és a csapdákból lévő hidrogén közt is történik cserélődés. Amennyiben az adott hidrogén csapda több hidrogéniont köt meg, mint amennyi belőle kilép, erős csapdáról beszélünk. [8]

Egy-egy ilyen hibahely, pl. mikroüreg túltelítetté válhat és környezetére igen nagy nyomást ($10^4 - 10^5$ bar) fejthet ki, amely kis alakváltozó képességű acél esetén repedés megjelenéséhez vezethet. [11]



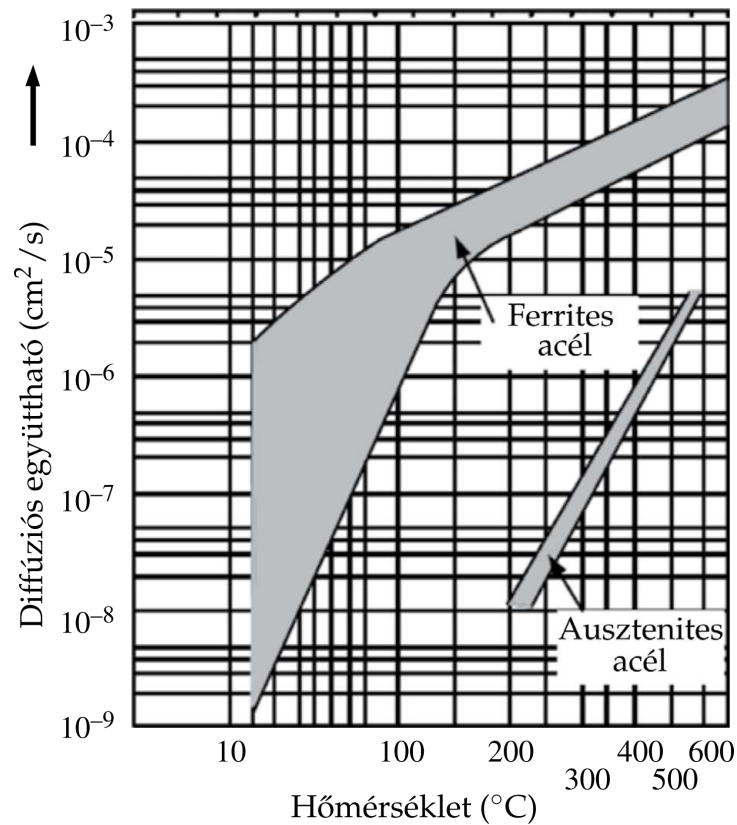
3.8. ábra. Repedésterjedés a hidrogén diffúziójával Troiano szerint [11]

Ahogy azt a 3.2. fejezetben ismertettem, a maradó feszültség valamint a kritikus hidrogén mennyiség elérése okozta nyomás hatására repedés jelenik meg. Ez a repedés tovább nő, a hidrogén pedig a repedés terjedése során annak csúcsa felé diffundál. A folyamat a 3.8. ábrán látható, ahol

- **I.** háromtengelyű feszültségi állapot kritikus mennyiségű hidrogén jelenléte mellett,
- **II.** új háromtengelyű feszültségi állapotú terület

A hegesztés befejeztével rögtön megkezdődik a hűlés, a hőmérséklet csökkenésével nő a mechanikai feszültség valamint a lokális hidrogéntartalom. Mindhárom tényező fontos szerepet játszik a hidegrepedés folyamatában.

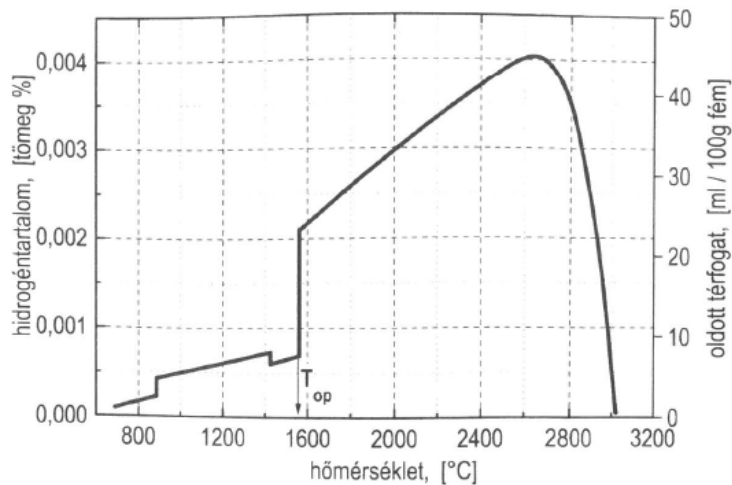
A hidrogén diffúziója ferritben három nagyságrenddel nagyobb lehet, mint az ausztenitben. Ennek oka a térben középpontosan köbös (TKK) és a felületen középpontosan köbös (FKK) rácsok térkitöltési tényezőjének különbsége. Ferrites szövetszerkezetekben a diffúziós együttható még 100 °C alatti hőmérsékleten is igen nagy ($\approx 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$). Ezzel magyarázhatók a késleltetett repedések szobahőmérsékleten. A diffúzió sebessége a bénites és martenzites szövetekben a legnagyobb. [11]



3.9. ábra. A diffúziós együttható a hőmérséklet függvényében [11]

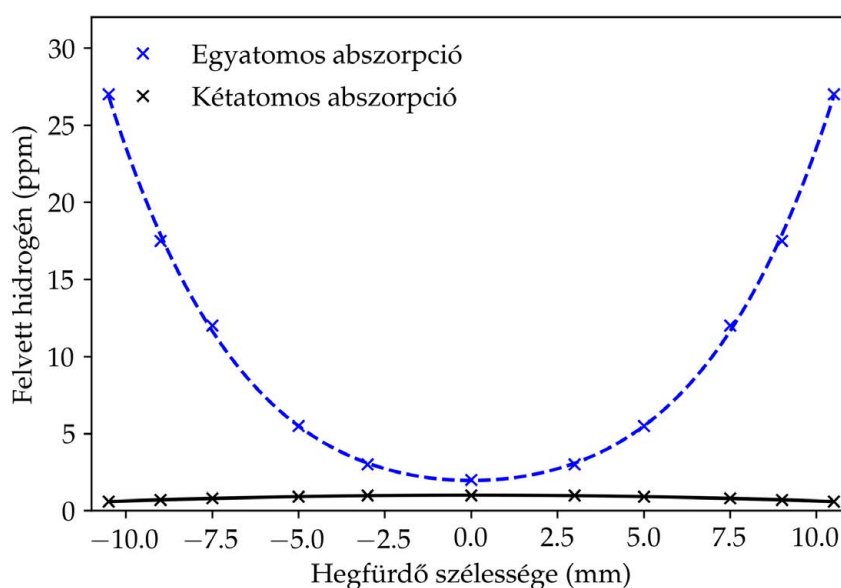
3.3. Hidrogén oldhatósága

Az acélok hidrogénoldó képessége függ a hőmérséklettől, nyomástól és az adott acél kristályszerkezetétől. A 3.10. ábrán látható, hogy tiszta vasban a hőmérséklet növekedésével nő az oldóképesség, ugrás figyelhető meg a folyadékfázis elérésekor. Folyadékfázisban



3.10. ábra. Hidrogén oldódása a vasban, a hőmérséklet függvényében [4]

a hidrogénoldó képesség 1600 °C hőmérsékleten és 1 bar nyomáson 34 ppm, míg szobahőmérsékleten igen kicsi, a martenzit 0,4 ppm, amely az ausztenitnél kisebb, a ferritnél (0,0004 ppm) azonban nagyobb. A gyors hűtés és a nemegyensúlyi átalakulás hatására a kialakuló szövetszerkezetben lévő hidrogéntartalom meghaladja annak oldóképességét.

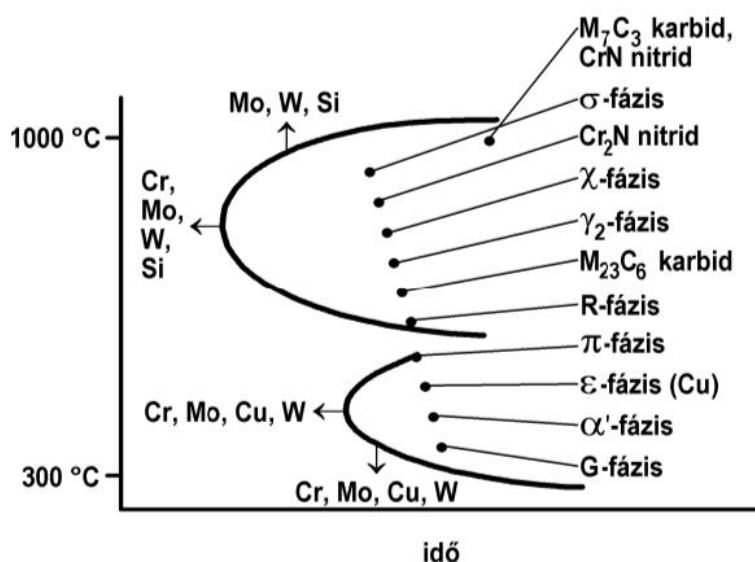


3.11. ábra. Hidrogén abszorpciója a hegfürdőben Gedeon szerint [8]

A Gedeon-féle modell szerint [8] az ívplazma nagy hőmérséklete elegendő a H_2 egyatomos hidrogénné való disszociációjához. A 3.11. ábrán látható tendencia figyelhető meg a hegfürdő hidrogén abszorpcióját tekintve. A hegfürdő hőmérsékletének csökkenésével nő a hidrogén abszorpciója, az egyatomos hidrogén legnagyobb része a beolvadási vonalhoz közeli részekben abszorbeálódik.

3.4. Duplex acélok hidegrepedése

A duplex acél kettős szerkezete (ausztenit-ferrit) miatt kevésbé érzékeny hidegrepedésre, mint a szénacélok. A 3.9. ábrán láthattuk, hogy a diffúziós együttható nagyságrendekkel nagyobb a ferrites szövetszerkezetben, mint az ausztenitesben. A duplex acélok nagy ötvözőtartalmából adódóan számos kiválás jelentkezhet a hegesztés során.



3.12. ábra. Duplex acélok tipikus kiválásai (J. Charles nyomán) [4]

Tekintsük első sorban a Cr_2N kiválásokat. A duplex acélok nitrogénnel való ötvözésének fő célja a folyáshatár és a korrózióállóság növelése. A nitrogénnel való ötvözés ausztenitképző hatása révén növeli az ausztenit arányát mind a varratfémekben mind annak hőhatásövezetében. Ez előnyös a hidegrepedés elkerülése szempontjából, ugyanis az ausztenit kevésbé érzékeny a hidegrepedésre, mint a ferrit. Azonban a túlszerű Cr_2N kiválások megjelenése a ferritben elősegítik a repedés megjelenését [13]. A Cr_2N kiválások jellemző hőmérséklettartománya 550 – 1000 °C [14].

Shinozaki és kutatótársai [13] 1.4462 (2205 duplex) típusú duplex korrózióálló acélok hidegrepedési érzékenységét vizsgálták. Kutatásukban megállapították, hogy jelentősen nő a repedésérzékenység, ha a ferrittartalom > 50%. Tovább növeli a ferrit repedésérzékenységét a nitrogéntartalom, a nagyobb mennyiségű Cr_2N kiválások miatt. Ezek

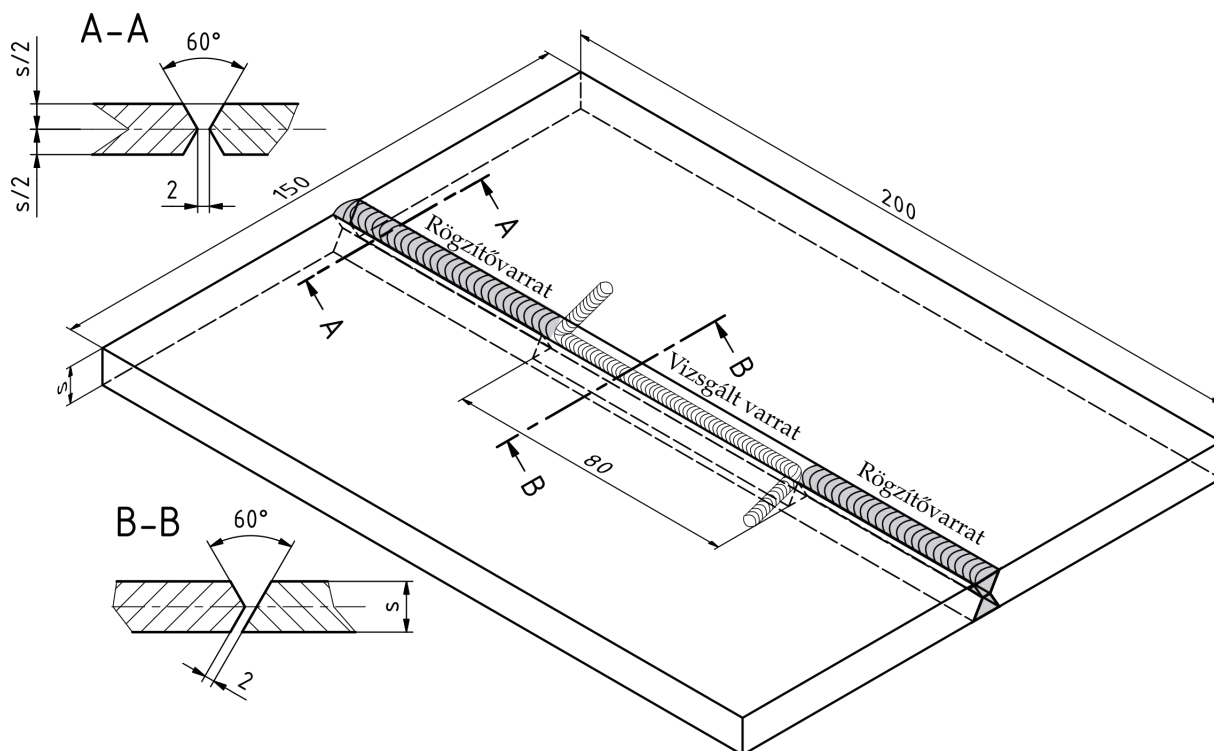
a tűszerű kiválások a repedések megjelenésének helyéül szolgáltak. A hegesztőanyag nitrogéntartalmának növelése megnöveli a varratfém ausztenit tartalmát, aminek köszönhetően csökken a hidegrepedés érzékenysége. A vizsgálatok során 0,5 – 0,7 kJ/mm hőbevitel és nagy nitrogén tartalom mellett a ferrittartalom 60-65% közeli. Kis hőbevitel értékeknél ($\approx 0,1$ kJ/mm) a ferrittartalom elérheti a 90%-ot is. Feltehetően a delta-ferrit (δ) a repedésérzékeny szövetelem, különösen ha nagy mennyiségű Cr_2N kiválásokat tartalmaz. Célunk tehát a ferrit-ausztenit tartalom optimális szinten tartása, valamint a diffúzióképes hidrogéntartalom csökkentése. Mivel a diffúziósebesség az ausztenitben nagyságrendekkel kisebb, mint a ferritben, kis mértékű csökkenés a ferrittartalomban már nagy hatással van a repedésérzékenységre. Továbbá az ausztenit hidrogénoldó képessége nagyobb, mint a ferrité, tehát a kisebb ferrittartalomhoz kisebb diffúzióképes hidrogéntartalom is társul, mivel a rendelkezésre álló hidrogén egy része az ausztenitben oldva marad [4][11][13].

A következőkben áttekintem a hidegrepedés vizsgálatára szolgáló különböző vizsgálati módszereket.

3.5. Tekken-próba

A Tekken-próba kialakítása látható a(z) 3.13. ábrán. A két lemezfelt összekötő rögzítővarratok hegesztésekor kis hidrogéntartalmú eljárást kell alkalmazni, majd az „Y” kialakításra kimunkált középső, 80 mm-es szakaszon a vizsgálandó hegesztőanyaggal kell egy, egysoros varratot létrehozni. A vizsgálandó varratot be- és kifutással kell hegeszteni, hogy a vizsgált részen teljes értékű varratunk legyen. [11]

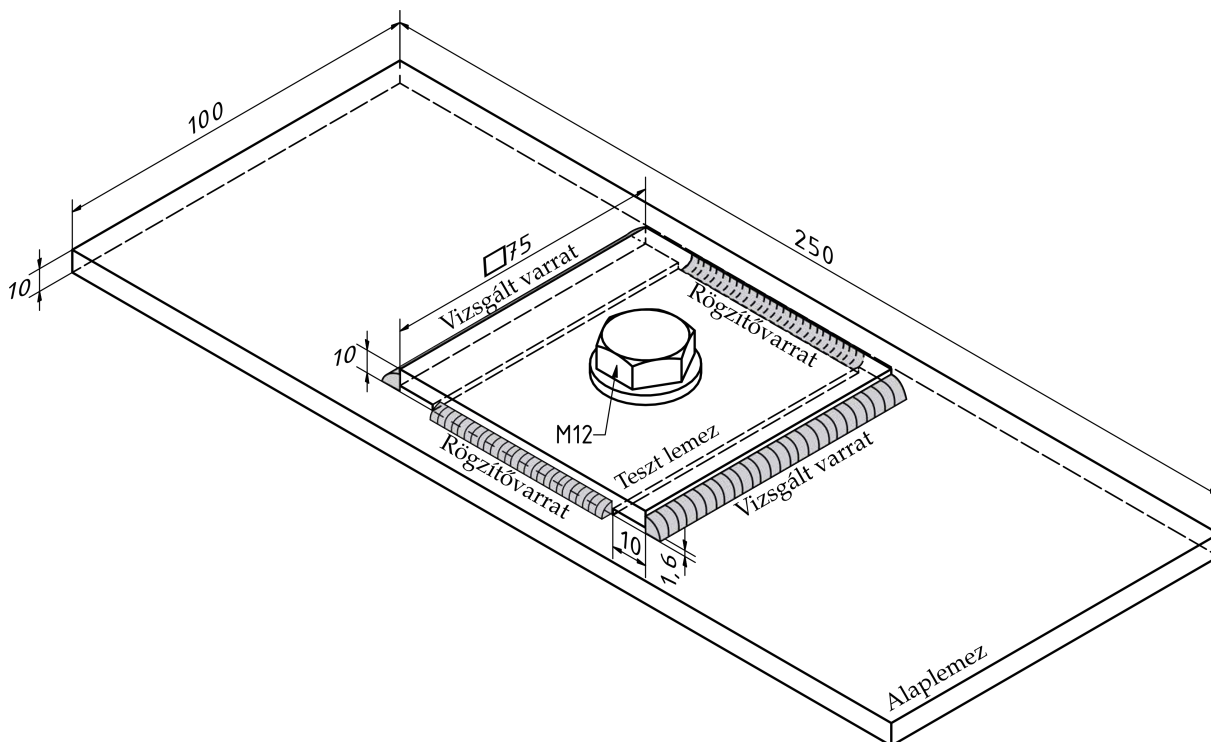
A próbatest kialakítása elősegíti a hidegrepedés kialakulását, a kimunkálás szögének köszönhetően a hidrogén mind a hőhatásövezetbe mind a varratfémbe diffundálhat. Általában, ha a varratfém szilárdsága nagyobb, mint az alapanyagé, a repedés a gyök- oldalon, a hőhatásövezetben fog megjelenni. Amennyiben az alapanyag szilárdsága nagyobb, a repedés a varratfémbe fog jelentkezni. A hegesztés után 72 órával lehet a mintát feldarabolni, vizsgálni. Erre a korábban tárgyalt késleltetett repedések kialakulása miatt van szükség. Kialakításának köszönhetően a vizsgált varrat gyökénél nagyobb húzófeszültség értékek jelentkeznek, a vizsgálat alkalmas a hidegrepedés elkerüléséhez szükséges kritikus paraméterek meghatározására. [11]



3.13. ábra. Tekken-próba kialakítása (MSZ EN ISO 17642-2:2005 szerint) [15]

3.6. Élsarokvarratos (CTS-próba) vizsgálat

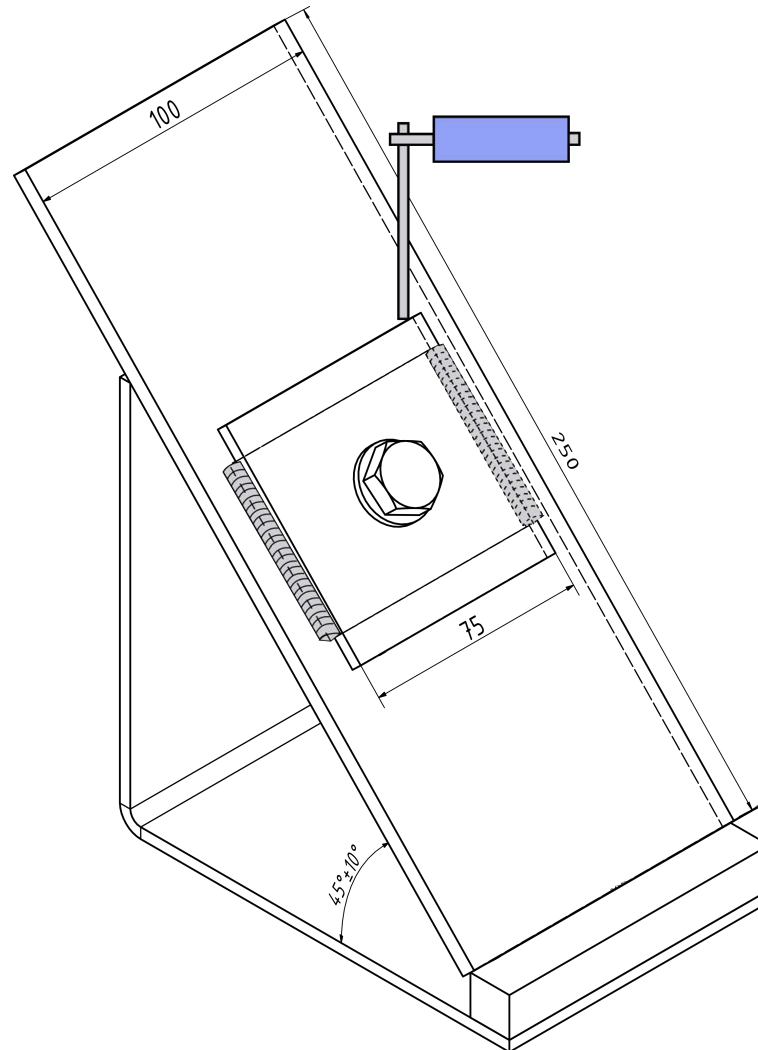
Az élsarokvarratos vizsgálat, más néven CTS-próba két azonos anyagú lemezből áll. Az alaplemezhez csavarozott kapcsolattal (M12) rögzítik a teszt lemezt, majd annak két oldalán rögzítővarratokkal fixálják. A kötőelemeket a szerelés előtt zsírtalanítani szükséges, kizárólag bevonat nélküli kötőelemek alkalmazhatók. A csavar meghúzási nyomatéka az MSZ EN ISO 17642-2:2005 szabványban rögzített, $100 \pm 5 \text{ N} \cdot \text{m}$. A teszt lemez két oldalán egy-egy $1,6 \times 10 \text{ mm}$ széles kimunkálás található, a vizsgált varrat felőli oldalon. A teszt lemeznek forgácsoltnak kell lennie, az érintkező felületek maximálisan megengedett felületi érdessége $R_a = 3,2 \mu\text{m}$. A vizsgálat kialakítása a 3.14. ábrán látható.



3.14. ábra. CTS-próba kialakítása (MSZ EN ISO 17642-2:2005 szerint) [15]

A hegesztési felületeknek fémtisztának kell lennie, revétől, rozsdától, olajtól és zsírtól mentesnek. A rögzítővarratok készítéséhez használt hegesztőanyag folyáshatárának meg kell egyeznie a tesztlemez folyáshatárával, vagy annál nagyobbnak kell lennie. Hegesztésük során kis hidrogéntartalmú eljárást kell alkalmazni, a rögzítővarratok elkészítése után 12 órával lehet a vizsgált varratokat hegeszteni. Az MSZ EN ISO 17642-2:2005 szabvány szerint a vizsgálatához szükséges minimális anyagvastagság 6 mm, a rögzítővarratok mérete 15 mm-es lemezig $a = 6 \text{ mm}$ [11].

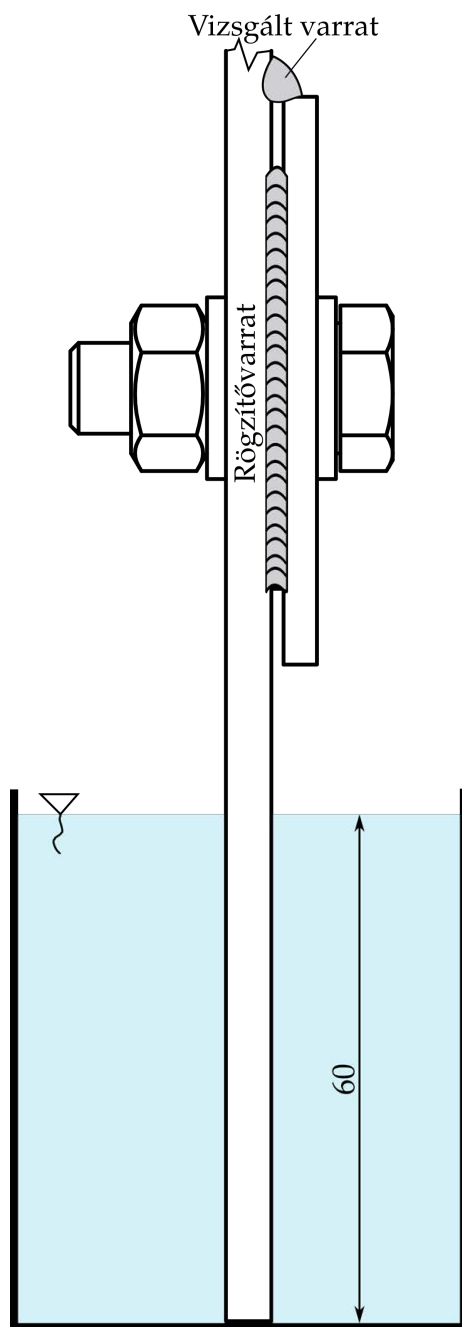
A vizsgált varratok hegesztéséhez egy támasztó készülék használata szükséges (3.15. ábra). A varratokat egy sorban, egy irányban kell hegeszteni, valamint nem lóghatnak túl a vizsgált lemez oldalának hosszán. A második vizsgált varrat hegesztése előtt 48 órát



3.15. ábra. Vizsgált varrat hegesztése támasztó készülékben (MSZ EN ISO 17642-2:2005 szerint) [15]

várni kell. Mindkét vizsgált varrat elkészülte után ismét 48 órát kell várni a metallográfiai csiszolatok elkészítése előtt. Varratonként 6db azonos méretű csiszolat készítését írja elő a szabvány, minimum 50-szeres nagyítás mellett. Amennyiben ekkora nagyítás mellett nem látható repedés, 200-szoros nagyítás javasolt az újbóli ellenőrzésre.

Mindkét vizsgált varrat hegesztése után a próbatest hűtését az alaplemezt vízbe merítve kell biztosítani, a 3.16. ábrán látható módon, a hegesztés befejezte után 60 másodpercen belül. A próbatestet a vízben kell tartani a környezeti hőmérséklet eléréig, a víz hőmérséklete a hűtés során nem haladhatja meg a 30 °C-ot.



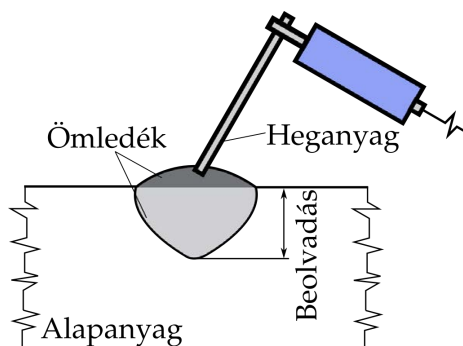
3.16. ábra. Próbatest hűtése vízben (MSZ EN ISO 17642-2:2005 szerint) [15]

4. fejezet

Az ívhegesztés alapjainak általános bemutatása

A hegesztés definíciója a Hegesztés és rokon technológiák című kézikönyv szerint a következő: „A *hegesztés* anyagok közötti hegesztett kötések létesítésére szolgáló eljárás. A *hegesztett kötés* két vagy több, munkadarab között (ömlesztő- vagy sajtolóhegesztéssel) létesített állandó, oldhatatlan és folytonos kohéziós kapcsolat. A hegesztés ekkor *kötőhegesztés*. A hegesztett kötésben eltűnnek a munkadarabok vagy a felület eredeti kontúrjai.” [16]

Alapvető feltétel, hogy a hegesztési folyamat során kellő mennyiségű ömledék keletkezzen és szilárduljon meg. Ez az ömledék a munkadarab(ok) és a heganyag megolvadt és összekeveredett részéből keletkezik. [16]

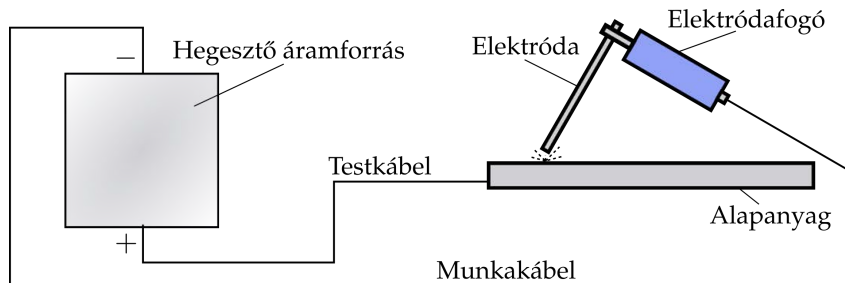


4.1. ábra. Ömlesztőhegesztéssel készített varrat keresztmetszete

„A hegesztett kötés legfontosabb tulajdonsága a kötés szilárdsága a kristályosodási és a *hidegrepedésektől* való mentesség és *ridegtöréssel* szembeni biztonság.” [16]

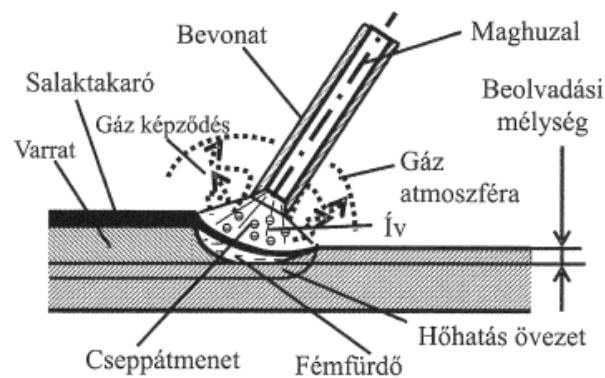
4.1. (111) Kézi ívhegesztés

Kézi ívhegesztés során a villamos ív a munkadarab és a leolvadó, bevont elektróda közt ég. A hegfürdő védelme az elektródán lévő bevonatból képződő anyagokkal történik. [16] Az MSZ EN ISO 4063:2016 szabvány szerinti kódszáma 111, az eljárás elvi vázlata a 4.2. ábrán látható.



4.2. ábra. Kézi ívhegesztés elvi vázlata (egyenes polaritás)

A rövidzárlatot követően létrejövő villamos ív a maghuzal és az alapanyag közt jön létre, mind a maghuzalt, bevonatot valamint az alapanyagot is megolvasztva.



4.3. ábra. Kézi ívhegesztés működési vázlata [16]

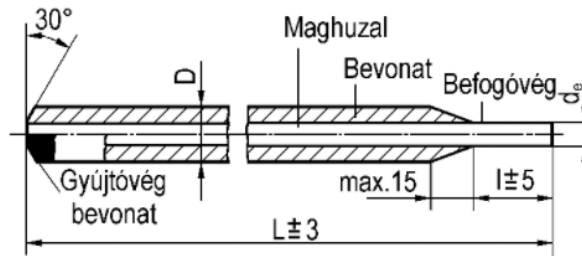
4.1.1. A bevonat feladata

A bevonatból salak és gáz képződik elősegítve a megfelelő minőségű varrat kialakulását. A salak a végbemenő metallurgiai folyamatban is részt vesz, lassítja a lehűlést, a képződő gáz pedig kiszorítja a levegőt a hegfürdő környezetéből, ezáltal védve azt annak káros alkotóitól.

Az elektróda bevonata megkönnyíti az ívgyújtást, újragyújtást valamint annak stabilitását. A bevonat alkotóelemei védőgázt fejlesztenek, amelynek legfontosabb szerepe a hegfürdő és a leolvadó cseppek levegőtől való védelme. Ilyen gázképző alkotók pl. a grafit, cellulóz valamint a különböző földfémek és alkáli fémek karbonátjai. A legfontosabb salakképző alkotók a vas- és mangán érc, mész, valamint a dolomit. Az

elektróda bevonata dezoxidálja a hegfürdőt, pótolja a hegesztés során kiegő ötvözőket, sőt ötvöző hatású is lehet. [17]

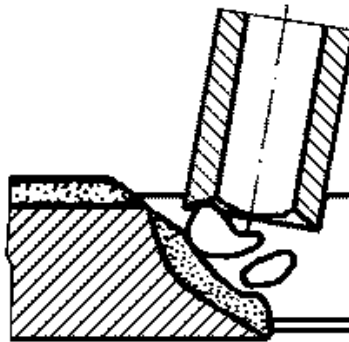
A következőkben áttekintem a különböző elektróda bevonatok típusait és azok jellemzőit.



4.4. ábra. Bevont ívhegesztő elektródák méretei [17]

4.1.2. Bázikus bevonat

A bázikus elektróda bevonatának fő alkotója a mészpát, ami hegesztés során CO_2 és CO keverékre bomlik, amely védőgázok a levegő káros alkotóival szemben védik a hegfürdőt. A bázikus salak jó dezoxidáló hatású, kis hőmérsékleten dermed. Kitűnő szívósságú varratot ad, ívgyújtási képessége rossz, ezért az elektróda végét grafitozzák. Bevonata nedvszívó, ezért felhasználás előtt 2-3 órán keresztül $\approx 300^\circ\text{C}$ -on ki kell szárítani.

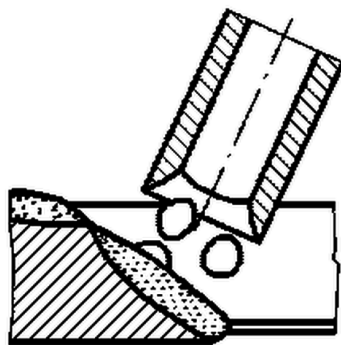


4.5. ábra. Bázikus cseppátmeneti forma (Killing szerint) [17]

Bázikus bevonatú elektródákra jellemző a nagycseppes anyagátvitel, amit a közepes áramerősség és közepes, vagy nagy feszültség eredményez. A cseppek alakja lehet szabályos, vagy szabálytalan, leválásukat a gravitációs erő határozza meg, emiatt pályájuk nem mindig tengelyirányú, ez okozza a hegesztés közbeni fröcskölést. [17] Varratának hidrogéntartalma megfelelő szárítás esetén 5 ml/100g varratfém érték környékére csökkenthető. [18]

4.1.3. Cellulóz bevonat

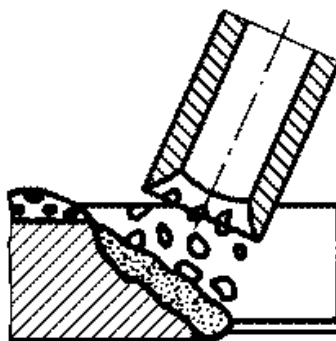
A cellulóz bevonat fő alkotóeleme 10...30 % éghető szerves anyag (cellulóz, faliszt, keményítő). Amennyiben a bevonat kötőanyaga vízüveg, egyenárammal, fordított polaritással kell hegeszteni, máskülönben egyenes polaritással vagy váltóárammal hegeszthetünk. A bevonatból a védőgáz exoterm oxidációs reakcióval képződik, ezért az elektróda leolvadása sok füsttel jár. Felhasználásuk elsősorban szabadtéri (helyszíni) hegesztés, fő alkalmazási területük különböző csőtávvezetékek hegesztése. A cellulóz elektródák a legtöbb hegesztési pozícióban alkalmazhatók, fő felhasználási területük a PG pozícióban való hegesztés. Az elektróda gyorsan dermedő, kis tömegű salakja elősegíti a nagyobb hegesztési sebességet, javítja a résáthidaló képességet. Az elektróda közepes cseppekben (4.6. ábra) olvad le, a varrat felülete durván pikkelyezett, domború. [17] Ezen elektródák fröcskölési vesztesége jelentős, varratának hidrogéntartalma magas ($H = 30 \dots 200 \text{ ml/100g varratfém}$). [18]



4.6. ábra. Cellulóz bevonatú elektróda cseppátmeneti formája (Killing szerint) [17]

4.1.4. Rutilos bevonat

A rutilos bevonat fő alkotója TiO_2 tartalmú rutil ásvány, amelyből 30...55 %-ot tartalmaz. Az elektróda salakja erősen savas jellegű, emiatt a varratfém szívóssága maximum a -20°C -ra előírt ütemmunka követelményét teljesíti. Leolvasztható egyenáram egyenes polaritással, valamint váltóárammal egyaránt. Az ív könnyen gyújtható, a rutil áramvezető képességéből kifolyólag az ívúragyújtási tulajdonsága is kedvező, nem igényel salakolást. Függőleges lefelé pozíciót kivéve minden hegesztési pozícióban alkalmazható. A varrat felülete sima, szabályosan pikkelyezett, sarokvarrata kevésbé domború. A bázikus és cellulóz bevonatú elektródáknál egyenletesebb, finomabb cseppekben olvad le. [17] Fröcskölési vesztesége kisebb a korábban felsorolt bevonatokhoz képest, varratának hidrogéntartalma 15 – 25 ml/100g varratfém [18]



4.7. ábra. Rutilos cseppátmeneti forma (Killing szerint) [17]

4.1.5. Rutil-bázikus bevonat

A rutil-bázikus bevonat egy átmenet a rutilos és bázikus bevonatok között. Bázikus mutatójának növekedésével a finomcseppes anyagátviteli forma fokozatosan közepes és nagycseppessé válik. Továbbá növekszik a bázikus mutatóval együtt a képlékenységi és szívóssági tulajdonsága, a varratfém oxigéntartalmának, zárványosságának csökkenésével. Használat előtt $250 \dots 300^\circ\text{C}$ -on 2 órát szükséges szárítani a nedvesség eltávolítása céljából. Öregedési hajlama sokkal kisebb, mint a rutilos bevonattal készített varratfémé. Varratának hidrogéntartalma a rutilos bevonathoz viszonyítva kisebb, legfeljebb $H_D = 10 \text{ ml}/100 \text{ g varratfém}$ [19].

4.1.6. Technológiai paraméterek

A kézi ívhegesztés jellemző paraméter tartományai a következők: [16]

- elektróda maghuzal átmérő: $d_e = 1,5 \dots 6 \text{ mm}$
- áramerősség: $I = 30 \dots 500 \text{ A}$
- ívfeszültség: $U = 20 \dots 50 \text{ V}$
- hegesztési sebesség: $v_{\text{heg}} = 8 \dots 20 \text{ cm/min}$

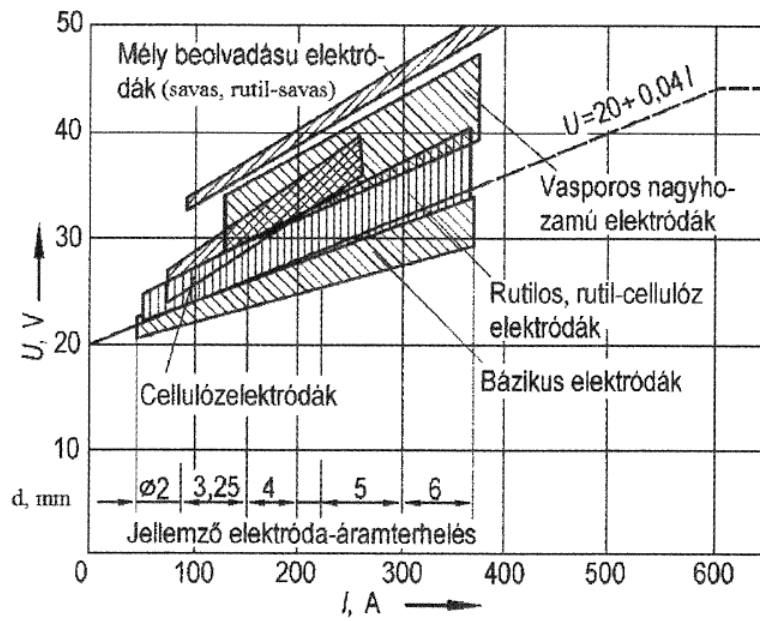
Amennyiben a hegesztési paraméterek nem állnak rendelkezésre, a Hegesztés és rokon technológiák című kézikönyv szerint a következőket használhatjuk: [16]

Az áramerősség amper (A) dimenzióban:

$$I = (30 \dots 60) \cdot d_e \quad (4.1)$$

Az ívfeszültség volt (V) dimenzióban:

$$U = 20 + 0,04 \cdot I \quad (4.2)$$



4.8. ábra. Bevont elektródák jellemző ívfeszültség- és áramerősség tartományai [16]

A fajlagos hőbevitel számítható:

$$q = \eta \cdot \frac{UI}{v_{\text{heg}}} \cdot 10^{-3} \text{ (kJ/mm)} \quad (4.3)$$

Ahol

- $\eta = 0,8$ kézi ívhegesztés esetén

5. fejezet

Kísérleti terv

A vizsgálat célja duplex korrózióálló acélok hidegrepedés-érzékenységének vizsgálata, különböző hidrogéntartalmú elektródák felhasználásával. A kísérletek során felhasznált anyag melegen hengerelt lemez formájában állt rendelkezésre, anyagminősége 1.4162 (X2CrMnNiN22-5-1) sovány duplex korrózióálló acél, egyezményes folyáshatára $R_{p0,2} = 450$ MPa, szakítószilárdsága $R_m = 650$ MPa, kémiai összetétele a 5.1. táblázatban látható. A választott anyagminőség felhasználási területe a hajógyártás, olajfúró tornyok illetve különböző offshore alkalmazások, ahol gyakori a helyszíni hegesztés. A korábban (3.6. pontban) ismertetett élsarokvarratos vizsgálat (CTS-próba) egy rétegben hegesztett sarokvarrat varratfém és annak hőhatásövezeti repedésérzékenységének meghatározására kiválóan alkalmas. A CTS-próba kialakításához szükséges lemezek keretes fűrészen kerültek ledarabolásra. A próbatest geometriája és a megfelelő élkiképzés marógépen lett kialakítva, a megfelelő felületi minőség és méretpontosság biztosítása miatt.

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
1.4162	0,04	6	1	0,04	0,015	1,7	22	0,8	0,8	0,25

5.1. táblázat. 1.4162 kémiai összetétele (maximális megengedett értékek) (%) [3]

5.1. Kísérleti paraméterek

A próbatestek méretei az MSZ EN ISO 17642-2:2005 szabvány szerintiek, a 3.14. ábrán láthatóak, befoglaló méretük 250 mm × 100 mm × 10 mm. A vizsgálatra három darab próbatestet készítettünk elő. A kísérleti paramétereket a 5.2. táblázat tartalmazza:

A próbatestek jelölése római számmal a sorszáma, arab számmal a vizsgálandó varrat sorszáma, próbatestenként két varrat.

Próbatest sorszáma	Felhasznált elektróda	Elektróda felvett nedvessége	Felület
Próbatest I/1	jelöletlen	száraz	tiszta
Próbatest I/2	jelöletlen	száraz	tiszta
Próbatest II/1	jelöletlen	száraz	festett
Próbatest II/2	jelöletlen	száraz	festett
Próbatest III/1	E1.	1,053 g	tiszta
Próbatest III/2	E4.	1,052 g	tiszta

5.2. táblázat. Kísérleti paraméterek

5.1.1. Elektróda felvett nedvessége

Minden felhasznált elektróda egyedi jelölést kapott (a befogóvégen), a száraz tömegét megmértem és feljegyeztem. Ezt követően az elektródákat 24 órára vízbe helyeztem, majd onnan kivéve egyesével zárható tasakokba helyeztem őket.



(a) Egyedi jelölés a befogóvégen



(b) Mérés a Denver Instrument APX-200 típusú 0,1 mg pontosságú mérlegen

5.1. ábra. A felvett nedvesség meghatározása

A sínzáras tasakkal együtt megmértem őket, majd a tasakot külön mérve annak tömegét levontam belőle. A nedves és a száraz tömeg különbsége adja az elektróda bevonata által megkötött nedvesség mértékét:

$$(m_{\text{tasakban}} - m_{\text{tasak}}) - m_{\text{száraz}} = m_{\text{felvett}} \quad (5.1)$$

A mérések eredményei a 5.3. táblázatban találhatók:

Elektróda sorszáma	Száraz tömeg (g)	Tasakkal mért tömeg (g)	Tasak tömege (g)	Felvett nedvesség (g)
Elektróda 0.	34,643	42,121	6,396	1,082
Elektróda 1.	34,594	41,971	6,324	1,053
Elektróda 2.	37,311	44,921	6,391	1,219
Elektróda 3.	34,009	41,462	6,346	1,107
Elektróda 4.	34,352	41,877	6,473	1,052
Elektróda 5.	34,992	42,535	6,485	1,058

5.3. táblázat. Elektródák mérésének eredményei

5.1.2. Felület

A próbatestek felülete alatt a vizsgált varratnál lévő alaplemez felszínét valamint a teszt lemezen kikészített leélezést értem. A leélezés felületét *tisztának* tekintem, amennyiben azt a hegesztés előtt mechanikusan megtisztítottuk, valamint az rozsa, zsír, olaj és reve mentes. A leélezés felületét *festettnek* tekintem, amennyiben az a hegesztés előtt 2 réteg akril festékkel bevont.



(a) Tiszta felület



(b) Festett felület

5.2. ábra. A kísérlet során vizsgált különböző felületek

A festésre *Super Spray Very Well!* típusú RAL 9005 színű akril festéket használtam, ≈ 30 cm távolságról 2 rétegben felhordva. A festést úgy készítettem el, hogy a teszt lemez sarkától (a varrat kezdetétől) legalább 10 mm tiszta felület maradjon (5.2.b ábra), a megfelelő ívgyújtás elősegítésére.

5.1.3. Hőbevitel

A hőbevitel értékére az *Avesta-How to weld duplex stainless steels* kézikönyvében a $0,5 \dots 1,5$ kJ/mm tartományt javasolják [5]. A vizsgálat során a hőbevitel értékét nem változtattam, kizárólag a hidrogén hatását vizsgáltam. Ennek megfelelően, a hegesztés során mért idő alapján és az 5.2 valamint az 5.3. alfejezetben felsorolt hegesztési paramé-

terekből számolva az átlagos hőbevitel értéke a 4.3. összefüggés szerint meghatározható:

$$\bar{q}_{131} = \eta \cdot \frac{UI}{\bar{v}_{\text{heg},131}} = 0,8 \cdot \frac{280 \text{ A} \cdot 25,2 \text{ V}}{5,6 \text{ mm/s}} = 0,92 \text{ (kJ/mm)} \quad (5.2)$$

$$\bar{q}_{111} = \eta \cdot \frac{UI}{\bar{v}_{\text{heg},111}} = 0,8 \cdot \frac{100 \text{ A} \cdot 28 \text{ V}}{2,85 \text{ mm/s}} = 0,79 \text{ (kJ/mm)} \quad (5.3)$$

A számításhoz felhasznált értékek a hegesztőgépen (*Syrius Migpulse 501 DPP*) beállított áramerősség és feszültség. A haladási sebesség stopperrel mért érték a hegesztések során. A mért értékeket valamint azok átlagát a 5.6. és 5.10. táblázatok tartalmazzák.

5.2. Rögzítővarratok hegesztése

A CTS-próba két oldalán lévő 55 mm-es rögzítő varratokat 131-ös eljárással készítettük el, a lehető legkisebb hidrogén bevitelre törekedve a varratfémekben. A hegesztéshez felhasznált huzal $d_h = 1,2 \text{ mm}$ átmérőjű *Thermanit 22/09* típusú ausztenit-ferrit szerkezetű duplex hegesztőanyag, kémiai összetétele a 5.4. táblázatban látható.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
Thermanit 22/09	0,025	0,5	1,6	23	9	3	0,14

5.4. táblázat. *Thermanit 22/09* típusú hegesztőhuzal kémiai összetétele (wt%)

	$R_{p0,2}$	R_m	A_{sz}	KV
Thermanit 22/09	510 MPa	700 MPa	25%	70 J

5.5. táblázat. *Thermanit 22/09* típusú hegesztőhuzal mechanikai tulajdonságai

A rögzítővarratok a következő hegesztési paraméterek és argon védőgáz (15 l/min) használata mellett készültek:

- Áramerősség: $I = 260 \text{ A}$
- Feszültség: $U = 25,2 \text{ V}$
- Hegesztési sebesség: $\bar{v}_{\text{heg},131} = 35 \text{ cm/min}$
- Huzalátmérő: $d_h = 1,2 \text{ mm}$
- Hőbevitel: $\bar{q}_{131} = 0,92 \text{ kJ/mm}$

A próbatestek összeállítását megelőzően a kimunkált darabok felületét megtisztítottam majd minden egyes próbatest egyéni számjelölést kapott. A hegesztés megkezdése előtt a teszt lemezre feljelöltem krétával a horony kezdetét, ennek segítségével a hegesztő a megfelelő ponton tudta abbahagyni a hegesztést (a rögzítővarrat nem érhet a horonyig).

A rögzítővarratok hegesztése során a hegesztési időt stopperrel mértem, amely alapján minden egyes rögzítővarratra meghatározható a fajlagos hőbevitel mértéke a 4.3 összefüggés szerint.

#	Hegesztési idő (s)	Haladási sebesség (cm/min)	Hőbevitel (kJ/mm)
I/1	10	33,0	0,95
I/2	11	30,0	1,05
II/1	9	36,7	0,86
II/2	9,5	34,7	0,91
III/1	9,8	33,7	0,93
III/2	8,5	38,8	0,81
Átlag	9,6	34,5	0,92

5.6. táblázat. Rögzítővarratok haladási sebessége és hőbevitel (I/1-2: Próbatétel # első és második rögzítővarrata)

A hegesztőanyag folyáshatára (5.5. táblázat) nagyobb, mint az alapanyagé, tehát megfelel a szabványban foglalt előírásoknak, alkalmazható rögzítővarratként CTS-próba során.

5.3. Vizsgálandó varratok hegesztése

A vizsgálandó varratokat eltérő körülmények közt tárolt *Corweld INOX E2209* típusú rutil-bázikus bevonatú elektródával készítettük, melynek kémiai összetétele a 5.7. táblázatban látható. A választott elektróda kiválóan használható minden hegesztési pozícióban, kivéve függőlegesen felülről lefelé. A varratfémre vonatkozó pitting index PREN = 35 – 36.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
INOX E2209	≤ 0,03	0,9	0,9	22,5	9	3	0,18

5.7. táblázat. *Corweld INOX E2209* típusú rutil-bázikus elektróda kémiai összetétele (wt%)

	R _{p0,2}	R _m	A ₅	KV
INOX E2209	> 540 MPa	> 680 MPa	> 22%	+20 °C > 50 J

5.8. táblázat. *Corweld INOX E2209* típusú rutil-bázikus elektróda mechanikai tulajdonságai

A varratok elkészítése előtt mindegyik próbatétel felülete a kísérleti tervben leírtak szerint lett kiképezve. Az elektródákat zárható tasakban tároltam a hegesztés megkezdéséig, azokat csak a hegesztés előtt közvetlenül távolítottam el belőlük. A próbatételeket ≈ 45°-ban megtámasztottuk (9. melléklet), a tesztlemez vizsgált varrathoz közeli részére felírtam a használt elektróda sorszámát.

A hegesztést az I. sorszámú próbatesttel kezdtük, tiszta felület, száraz elektróda, ezt a darabot fogom referenciának tekinteni. Az elektróda ívgyújtási képessége jónak mondható, az ív stabil volt, nem volt tapasztalható fröcskölés.

A nedves elektródák esetén érezhetően rosszabb volt az ívgyújtóképesség, fröcskölés azonban csak a III. számú próbatest esetén volt tapasztalható.

A vizsgálandó varratok az alábbi hegesztési paraméterek mellett készültek:

- Áramerősség: $I = 100 \text{ A}$
- Feszültség: $U = 28 \text{ V}$
- Hegesztési sebesség: $\bar{v}_{\text{heg},111} = 17 \text{ cm/min}$
- Elektróda átmérő: $d_e = 3,2 \text{ mm}$
- Hőbevitel: $\bar{q}_{111} = 0,79 \text{ kJ/mm}$

	Méret	Áramerősség	Feszültség
INOX E2209	d3,2 x 350 mm	70 – 100 A	25 – 30 V

5.9. táblázat. Corweld INOX E2209 típusú rutil-bázikus elektróda jellemzői

#	Hegesztési idő (s)	Haladási sebesség (cm/min)	Hőbevitel (kJ/mm)
I/1	26,0	17,2	0,78
I/2	27,8	16,1	0,83
II/1	27,5	16,3	0,82
II/2	26,4	16,9	0,79
III/1	25,3	17,7	0,76
III/2	25,0	17,9	0,75
Átlag	26,3	17	0,79

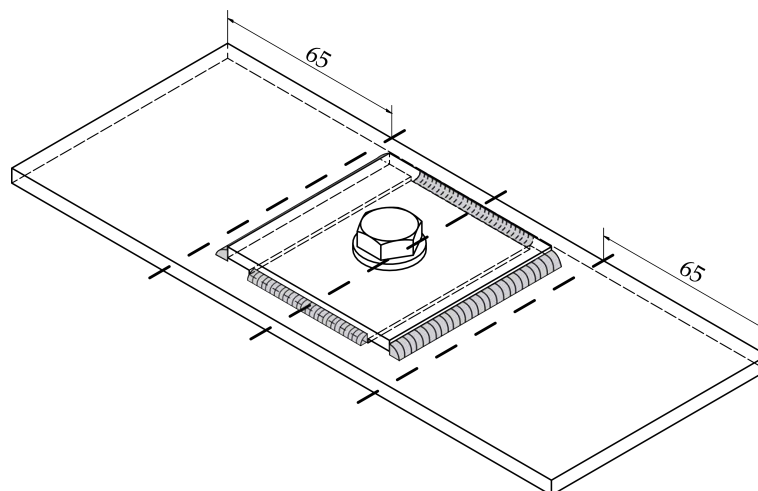
5.10. táblázat. Vizsgált varratok haladási sebessége és hőbevitel (I/1-2: Próbatest # első és második vizsgálat varrata)

Minden vizsgált varratot az MSZ EN ISO 17642-2:2005 szabványban foglaltak szerint készítettünk el, a szabványban szereplő készülékben, amit korábban a 3.15. ábrán szemléltettem.

5.4. CTS-próbatestek

A hegesztés befejezte után 48 órával lehet megkezdeni a próbatestek előkészítését a vizsgálatra. A hegesztett mintákat a 48 óra elteltével eltávolítottam a vízből, majd a 5.3. ábrán látható módon feldaraboltam őket a metallográfiai csiszolatok könnyebb kialakítása érdekében. A próbatest hosszirányában mindkét végéből 65-65 mm távolságra

levágtuk keretes fűrészen, kis előtolással, folyamatos hűtéssel. Az így kapott darabot a csavar eltávolítása után a furat középpontjánál félbevágtuk, majd azokra ismét felkerült az egyéni jelölésük.



5.3. ábra. Nagyoló darabolás a mintelőkészítés előtt (vágás a szaggatott vonalak mentén)

Az elkészült próbatestek a 5.5. és 5.6 ábrákon láthatóak.

5.4.1. Roncsolásmentes vizsgálatok

A vizsgálat egy szemrevételezéssel (VT) kezdődik, amennyiben a felületre kifutó makrorepedést tartalmaz a próbatest, azt azonnal észlelhetjük. Felületre kifutó repedés esetén a vágást a repedés legszélesebb pontjánál végezzük el, hogy a csiszolaton a repedés teljes keresztmetszetében látható legyen. A vizsgált 5 próbatest esetén felületre kifutó makrorepedést nem találtam.

Sorszám	Varratalak	Fröcskölés	Felületi pórusok	Felületre kifutó repedés
Próbatest I/1		X	X	X
Próbatest I/2		X	X	X
Próbatest II/1		X	X	X
Próbatest II/2		X	X	X
Próbatest III/1		✓	✓	X
Próbatest III/2		✓	✓	X

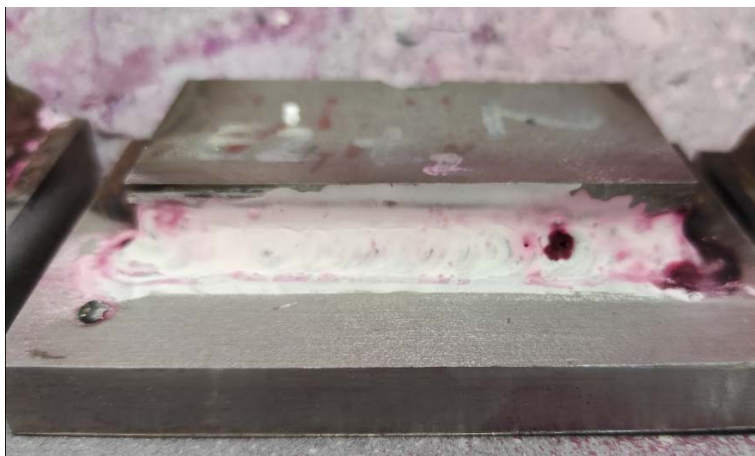
5.11. táblázat. Szemrevételezés eredményei

Mivel szemrevételezéssel nem volt látható repedés, folyadék penetrációs vizsgálatot hajtottam végre. A PT vizsgálat elvégzéséhez első lépésben a *Pfinder 890* jelű lemosóval

minden varrat felületét megtisztítottam a szennyeződéstől és szárazra töröltem, majd azokat egy tálcában helyeztem el. A varratok szárazra törlése után a *Pfinder 860* jelű piros színű penetráló szerrel minden varratot lefújtam és 5 percet vártam. Az 5 perc elteltével a varratokat ismét megtisztítottam és szárazra töröltem, majd a *Pfinder 871* típusú előhívóval lefújtam és ismét 5 percet vártam, az indikációk megjelenésére.

Próbatest sorszáma	t_1 indikáció	t_2 indikáció
Próbatest I.	X	X
Próbatest II.	X	X
Próbatest III.	✓	✓

5.12. táblázat. Folyadék penetrációs vizsgálat eredménye (t_1 első vizsgált varrat, t_2 második vizsgált varrat)



5.4. ábra. Folyadék penetrációs vizsgálat (III/2 próbatest esetén)



(i) Probatest I/1



(ii) Probatest III/1

5.5. ábra. CTS-próbatestek (1/2)

A III. sorszámú próbatest mindkét varrata esetén 16. és 17. mellékletek felületi pórusokat indikált a penetrációs vizsgálat. Az MSZ EN ISO 6520-1:2008 szabvány szerinti kódszáma 2017, legnagyobb megengedett mérete D minőségi szinten a varratra vonatkozóan $d \leq 0,3a \approx 0,9$ mm, C minőségi szinten $d \leq 0,6$ mm, B minőségi szinten nem megengedett. A III. sorszámú próbatest első vizsgált varratán indikált felületi pórus legnagyobb felületen mérhető mérete $d \approx 0,8$ mm A III. sorszámú próbatest második vizsgált varratán indikált felületi pórus legnagyobb felületen mérhető mérete $d \approx 1$ mm.

A folyadékbehatolási vizsgálat eredménye a vártak megfelel, ugyanis az indikációk a varrat szemrevételezése során is látható porozítások voltak.



(i) Próbatest II/2



(ii) Próbatest III/2

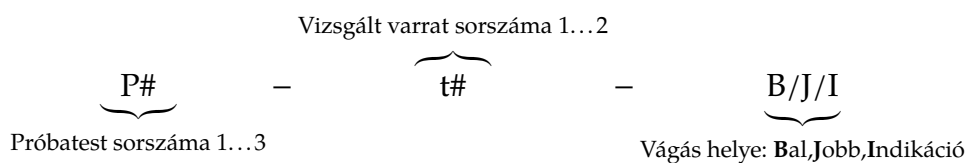
5.6. ábra. CTS-próbatestek (2/2)

5.4.2. Minták darabolása

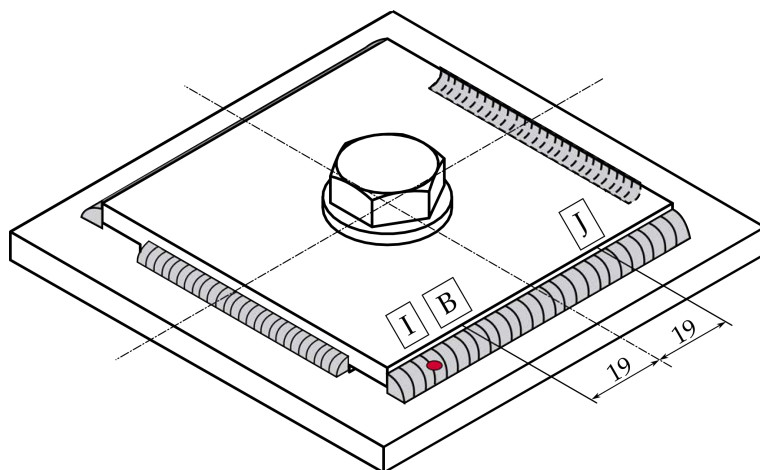
A folyadékbehatolási vizsgálat után minden minta esetén feljelöltem a csiszolatok elkészítéséhez szükséges vágások helyét a következőképpen:

- a penetrációs vizsgálat eredményeképp *indikáció nincsen*:
 - a minta közepétől balra és jobbra 19 mm távolságra készítek két csiszolatot
- a penetrációs vizsgálat eredményeképp *van indikáció*:
 - az indikáció helyénél egy csiszolat,
 - az ellenkező oldalon (bal↔jobb) a középponttól 19 mm távolságra egy csiszolat

A csiszolatok jelölésére használt rendszer a következő:



A ledarabolt ≈ 8 mm vastagságú mintákat egyedi jelöléssel láttam el, majd egyesével beágyaztam őket a csiszoláshoz.



5.7. ábra. Darabolás a csiszolatok előkészítéséhez

5.5. Csiszolatok

A csiszolatokat a beágyazást követően a felületi minőségüktől függően P180 vagy P320 csiszoló korongon kezdtem el csiszolni. A csiszolás menete a következő volt: (P180) → P320 → P600 → P1200 → P2500 → P4000. Ezt követően 3 mikron szemcseméretű gyémánt szuszpenzió segítségével felpolíroztam a mintákat.

A maratáshoz *módosított Beraha 2* marószert használtam, melynek összetétele a következő: 60 ml H_2O , 30 ml HCl , 1,5 g $K_2S_2O_5$. A maratás ideje ≈ 12 másodperc volt.

5.6. Csiszolatok kiértékelése

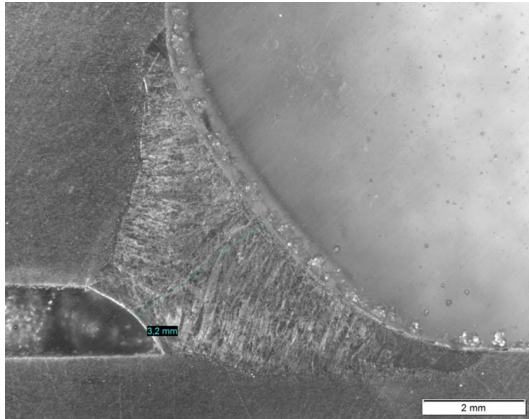
A csiszolatok kiértékeléséhez a 5.8. ábrán látható Olympus PMG 3 típusú fémmikroszkópot használtam. A mikroszkóphoz rendelkezésre álló objektívek: 5, 10, 20, 50, 100.



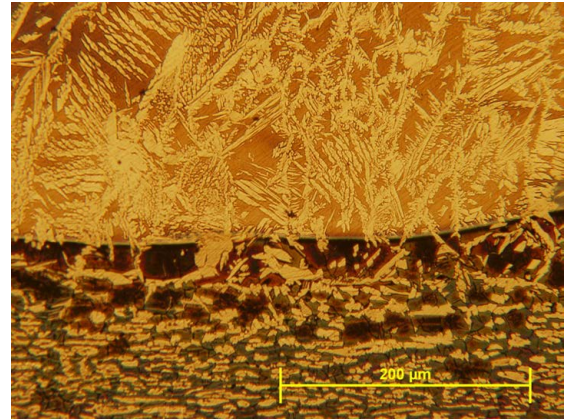
5.8. ábra. Olympus PMG 3 típusú fémmikroszkóp

5.6.1. P1-t1 varrat kiértékelése

Tiszta felület, száraz elektróda. Ebből a próbatestből kimunkált két csiszolatot fogom referenciának tekinteni a későbbiekben. A csiszolatok alapján a varratban és annak hőhatásövezetében repedés, porozitás nem található.



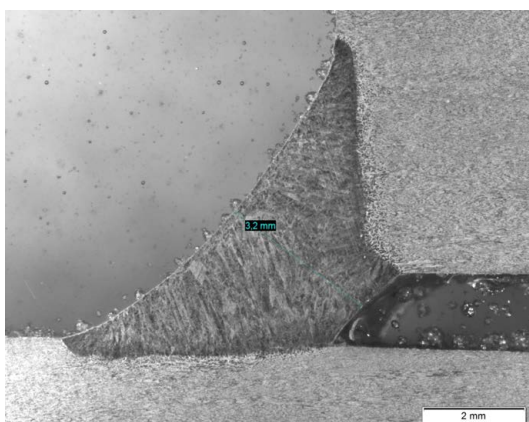
(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a varratról



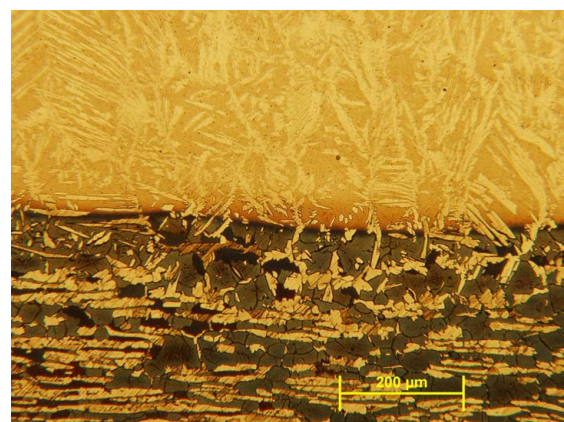
(ii) Fémmikroszkópi felvétel a varrat szerkezetéről

5.9. ábra. P1-t1-B minta varratgeometriája és szerkezete

A varratfémbe kellő mennyiségű ausztenit tudott kialakulni, amely számunkra kedvező a repedésérzékenységet tekintve. Feltehetően ennek köszönhető, hogy nem alakult ki repedés a varratban. A ferrittartalom mérésével pontosan meg tudnánk határozni az eltérést a varratfém és az alapanyag szövetelem-arányaiban. Ezt a mérést idő hiányában a TDK dolgozatomban nem tudtam elvégezni, de a jövőben feltétlen végre fogom hajtani. Jól látható a 5.9.(ii). ábrán, hogy a varratfém ferrit szemcséi durvábbak, valamint a gyors hűlés miatt Wildmannstätteni ausztenit van jelen [20]. Továbbá megfigyelhető, hogy a hőhatásövezetben nagyobb a ferrittartalom, mint a varratfémbe vagy az alapanyagban.



(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a varratról

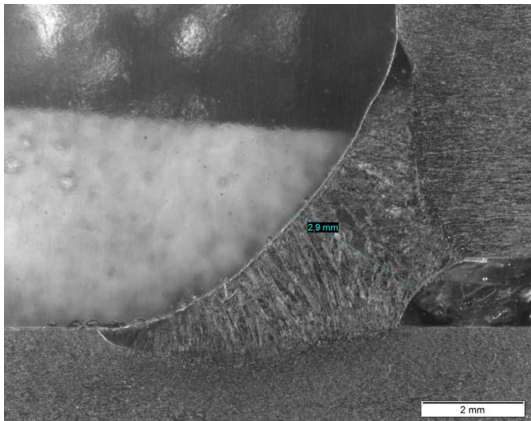


(ii) Fémmikroszkópi felvétel a varrat szerkezetéről

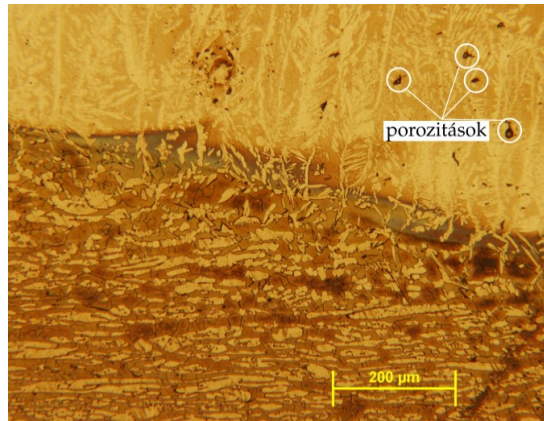
5.10. ábra. P1-t1-J minta varratgeometriája és szerkezete

5.6.2. P2-t2 varrat kiértékelése

Festett felület, száraz elektróda. A csiszolatok alapján a varratban és annak hőhatásövezében repedés nem található. A szövetszerkezeti különbség a referencia varrathoz képest nem látható. A 5.11.(ii). ábrán látható porozításokat feltehetően a festék okozza, ugyanis azok csak a varrat alapanyag felőli részein láthatóak.



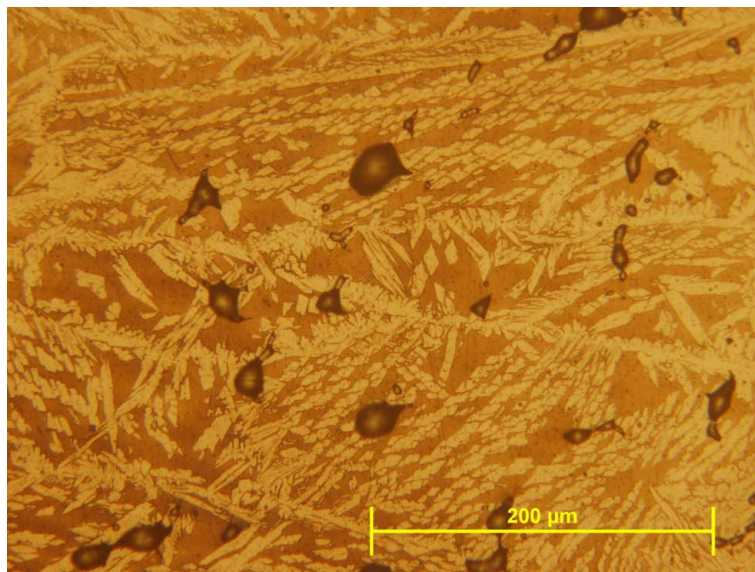
(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a varratról



(ii) Fémmikroszkópi felvétel a varrat szerkezetéről

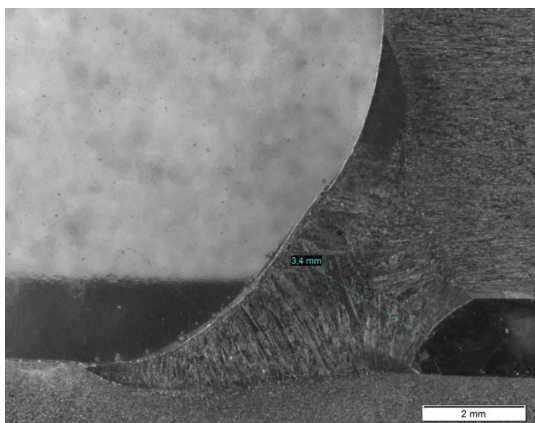
5.11. ábra. P2-t2-B minta varratgeometriája és szerkezete

Ezeket a festék okozta porozításokat közelebbről a 5.12. ábrán láthatjuk.

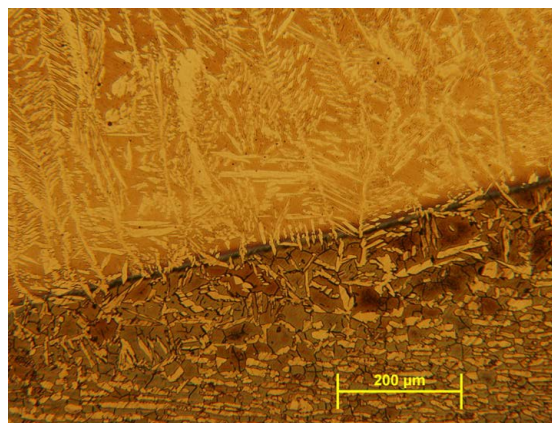


5.12. ábra. Festék okozta porozítások a varratfémbe

A varrat második csiszolatában ezek a porozítások nem láthatóak. Megfigyelhető azonban, hogy a varrat gyökmérete nem azonos, az előző mintához képest itt $\approx +0,5$ mm eltérés mérhető (5.15.(i). ábra). Ez a különbség az elektróda leolvadásában is tapasztalható, a festett mintán végzett hegesztések során volt a legkisebb a megmaradó elektróda hossza.



(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a varratról

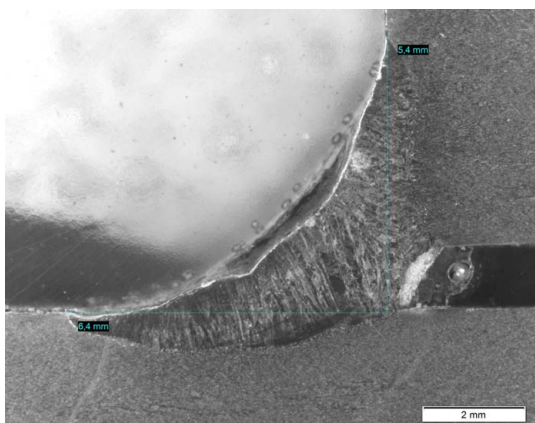


(ii) Fémmikroszkópi felvétel a varrat szerkezetéről

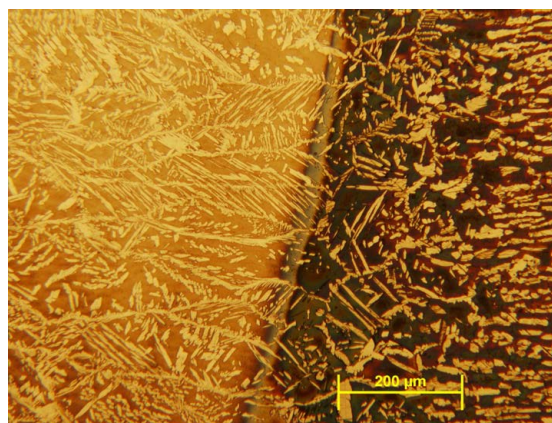
5.13. ábra. P2-t2-J minta varratgeometriája és szerkezete

5.6.3. P3-t1 varrat kiértékelése

Tiszta felület, nedves elektróda. A csiszolatok alapján a varratban és annak hőhatásövezetében repedés nem található. A szövetszerkezetbeli különbség a referencia varrathoz képest nem látható. A varrat nem szimmetrikus, az alakja kevésbé egyenletes, mint a referenciánál. Beolvadási mélysége nagyobb, mint a referencia varraté.



(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a varratról



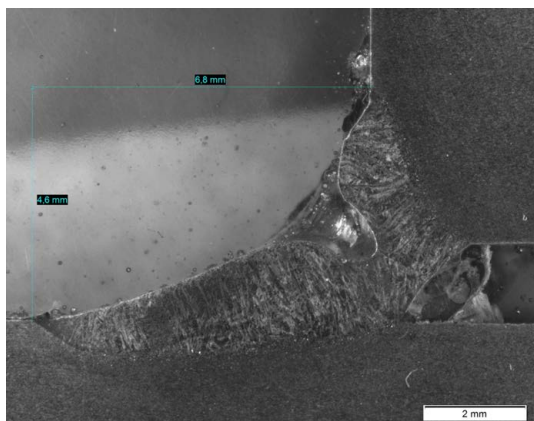
(ii) Fémmikroszkópi felvétel a varrat szerkezetéről

5.14. ábra. P3-t1-I minta varratgeometriája és szerkezete

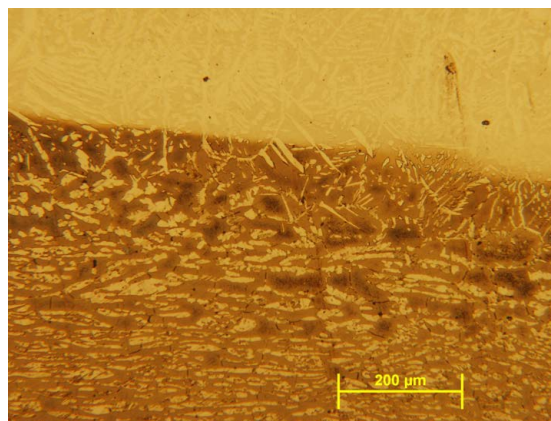
Tekintettel a varrat asszimetriájára, a következő mintát ugyanazon próbatest második varratából veszem.

5.6.4. P3-t2 varrat kiértékelése

Tiszta felület, nedves elektróda. A csiszolatok alapján a varratban és annak hőhatásövezetében repedés nem található. A szövetszerkezetbeli különbség a referencia varrathoz képest nem látható. A varrat ebben az esetben sem szimmetrikus. Beolvadási mélysége nagyobb, mint a referencia varraté.



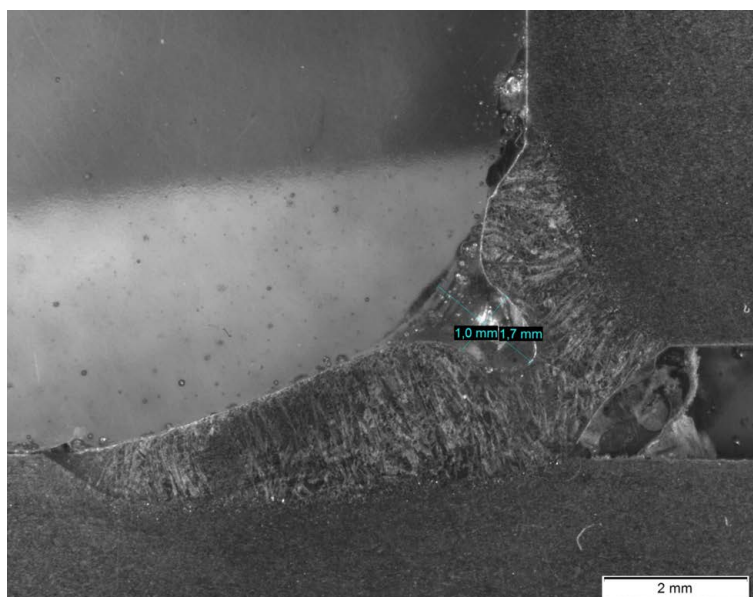
(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a varratról



(ii) Fém mikroszkópi felvétel a varrat szerkezetéről

5.15. ábra. P3-t2-I minta varratgeometriája és szerkezete

A varratban jelentős méretű tömlő alakú gázzárvány (5.16. ábra) található, amely 1 mm széles és 1,7 mm mélységű.



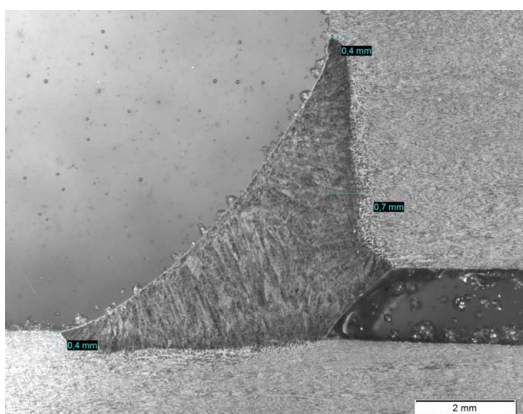
5.16. ábra. Gázzárvány P3-t2-I mintában

5.6.5. Beolvadási mélységek

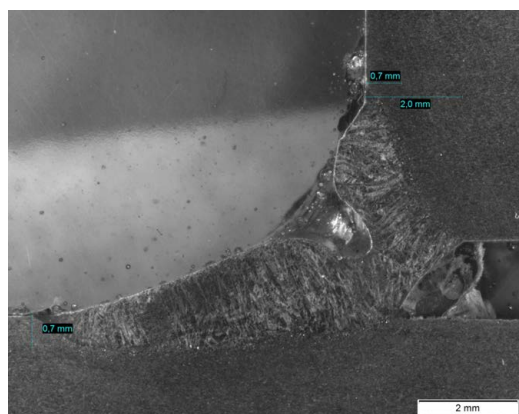
A csiszolatokon sztereo mikroszkóp segítségével megmértem a beolvadási mélységeket a különböző minták esetén.

Próbatest sorszáma	Beolvadási mélység az alaplemezben	Beolvadási mélység az tesztlemezben	Hőbevitel
Próbatest I/1	0,4 mm	0,4 - 0,7 mm	0,78 kJ/mm
Próbatest II/2	0,6 mm	0,5 - 1 mm	0,79 kJ/mm
Próbatest III/1	0,8 mm	0,7 - 1 mm	0,76 kJ/mm
Próbatest III/2	0,7 mm	0,7 - 2 mm	0,75 kJ/mm

5.13. táblázat. Beolvadási mélységek az alap- és teszt lemezekben

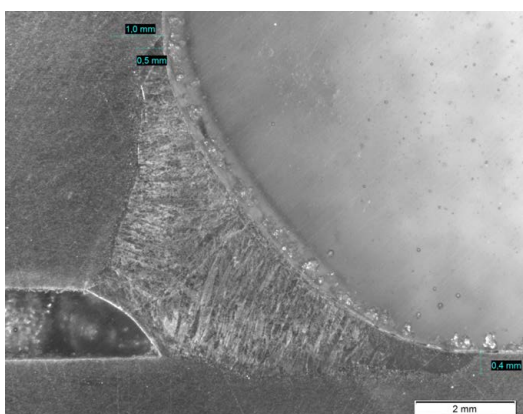


(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a P1-t1 varratról

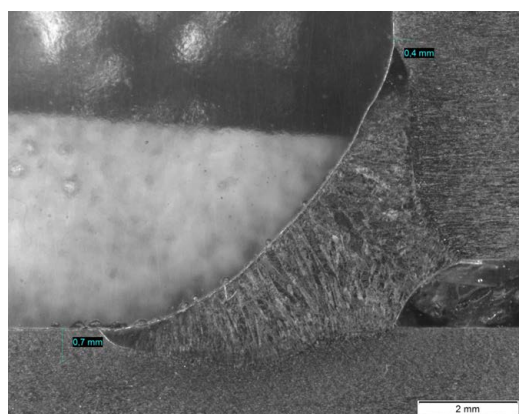


(ii) Sztereo mikroszkópi felvétel a P3-t2 varratról

5.17. ábra. Száraz és nedves elektródával készült varratok beolvadási mélységének különbsége



(i) Sztereo mikroszkópi felvétel a P1-t1 varratról

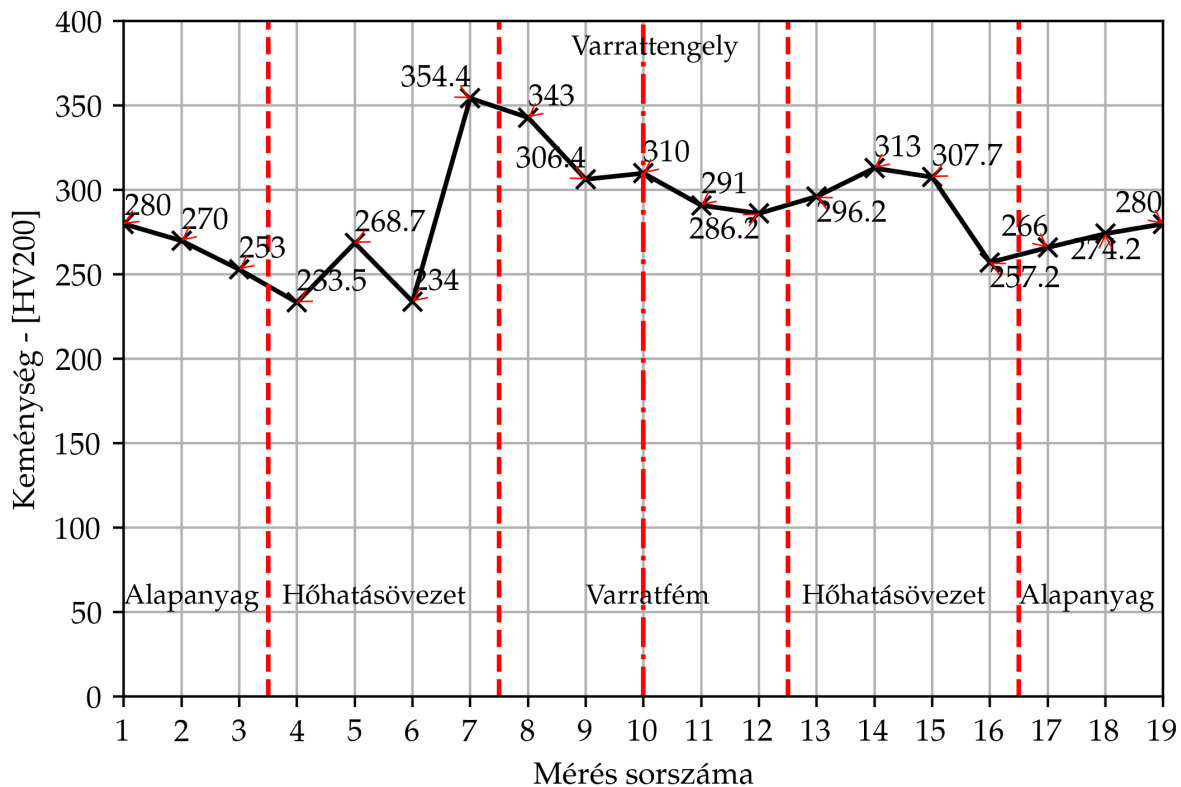


(ii) Sztereo mikroszkópi felvétel a P2-t2 varratról

5.18. ábra. Tiszta és festett felületre készült varratok beolvadási mélységének különbsége

5.6.6. Keménységmérés

Keménységet a referenciának tekintett P1-t1 varraton mértem. A hőbevitel számottevően nem változott a különböző próbatestek hegesztése során, ezért jó közelítéssel azonosnak tekinthető a keménységük.



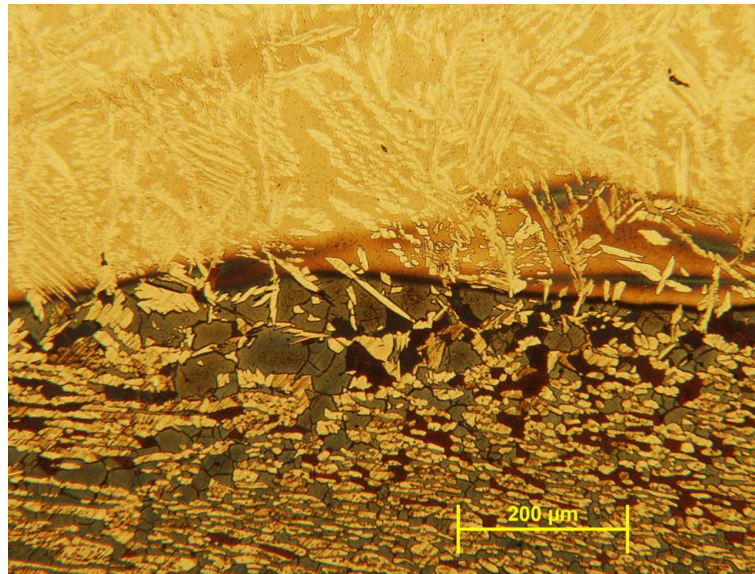
5.19. ábra. P1-t1 varrat keménységmérési eredménye

5.6.7. Csiszolatok vizsgálatának eredményei

A következőkben összefoglalom a csiszolatok vizsgálata, mérése során tett megfigyeléseimet.

A szakirodalmi összefoglalás során leírtaknak megfelelően, a varratfémbe az alapanyag ausztenit-ferrit arányához hasonló szövetszerkezeti arány alakult ki. Ez köszönhető a hegesztőanyag ausztenitképzőkkel (pl. Ni) való túllőt看zésének, valamint a megfelelő fajlagos hőbevitel ($\bar{q}_{111} = 0,79 \text{ kJ/mm}$) alkalmazásának. Mindhárom vizsgált próbatest esetén megfigyelhető az eltérés az ausztenit szemcsékben, az alapanyagétól eltérő módon Wildmannstätteni oldallemezek vagy szemcsék közti lemezek formájában alakultak ki.

A varratok hőhatásövezetében a tisztán ferrites tartományba való hevülés és az azt követő gyors hűlés következtében az alapanyagénál nagyobb a ferrittartalom (5.20. ábra). Ez a jelenség mindhárom vizsgált próbatest csiszolatain jól látható. Mivel a ferrit

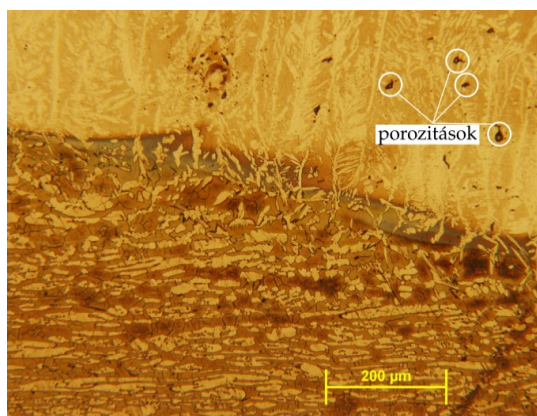


5.20. ábra. Nagy ferrittartalom a referencia varrat hőhatásövezetében

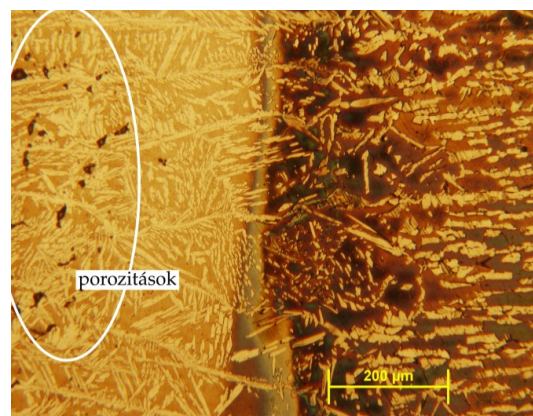
a repedésre hajlamosabb szövetelem, a nagyobb ferrittartalom növeli a repedésérzékenységet. A ferrit kisebb mértékben oldja a hidrogént, mint az ausztenit, valamint a különböző intermetallikus kiválások előszeretettel jelennek meg a δ/δ -fázishatárokon, tovább ridegítve annak szerkezetét.

Intermetallikus kiválásokra utaló jelet egyik csiszolat vizsgálata során sem találtam, sem a varratfémbe, sem annak hőhatásövezetében.

A varratokat a szabványnak (MSZ EN ISO 17642-2:2005 [15]) megfelelő módon először 50-szeres, majd 200-szoros nagyítás mellett vizsgáltam. Hidrogén indukálta makro- illetve mikrorepedés egyik próbatest varratában sem volt észlelhető.



(i) Porozitások a varrat alaplemez felőli oldalán



(ii) Porozitások a varrat tesztlemez felőli oldalán

5.21. ábra. Festék okozta porozitások a II. sorszámu próbatest P2-t2 varratában

Felületi pórusok már a szemrevételezéses vizsgálat során észlelhetők voltak, a nedves elektródával végzett varratokon (II. próbatest). A folyadékbehatolós vizsgálat sem mutatott az I. és III. sorszámú próbatestek varratain sem repedést, sem felületi pórust. A III. sorszámú próbatest P3-t2-I jelű csiszolatán látható egy 1 mm × 1,7 mm méretű tömlő alakú gázzárvány. A II. sorszámú próbatestből kimunkált P2-t2-B jelű csiszolat varratának alapanyag felőli részein láthatók a festék okozta porozitások (5.21. ábra). A vártak megfelelően, a tiszta felületre, száraz elektródával készített varrat (I. próbatest) nem tartalmaz porozitásokat.

A beolvadási mélységek mérésekor (5.6.5. alfejezet) a hidrogénnel szennyezett minták esetén nagyobb beolvadási mélységeket mértem, a hőbevitel nagyjából azonos volt (5.13. táblázat). A varratgeometriát tekintve minden varrat homorú, a hidrogénnel szennyezett varratok asszimmetrikusak, alakjuk kevésbé egyenletes mint a referencia varraté. Ezeket az idő szűkössége miatt nem volt lehetőségem behatóan megvizsgálni, de a jövőben feltétlenül meg szeretném őket vizsgálni. A referencia varrat szimmetrikus, felülete sima, enyhén pikkelyezett, esztétikus megjelenésű. A hidrogénnel szennyezett varratok felülete durván pikkelyezett.

A hegesztés során különösebb komplikáció nem adódott az elektródák nedvességéből, azonban az ívgyújtóképességük érezhetően rosszabb volt, mint a száraz elektródáké. A hegesztés hangja mindhárom próbatest esetén kellemes, egyenletes volt, az a festett felületre érve sem változott meg jelentősen.

6. fejezet

Összefoglalás

A következőkben összefoglalom a vizsgálatom eredményeit és javaslatot teszek a további vizsgálati irányokra.

6.1. Eredmények

6.1.1. *Duplex acélok hidegrepedési érzékenysége*

Vizsgálatom elsődleges célja a hidegrepedési hajlandóság vizsgálata volt. Meglepő eredmény számomra, hogy a vizsgálataim alapján a nedves elektródával és a festett felületre készített varratok sem repedtek el. A varratok felületén és azok csiszolatain sem találtam repedésre utaló jeleket.

6.1.2. *Porozitás*

Vizsgálataim alapján egyértelműen látszik a hidrogén porozítások létrejöttét elősegítő hatása. A nedves elektródával készített varratokban több jelentős méretű tömlő alakú gázzárvány található. Méretük több esetben is meghaladja az MSZ EN ISO 5817:2014 szabvány szerint megengedett értékeket. Ezek mellett több kis méretű felületi pórus is található a hidrogénnel szennyezett varratokban.

6.2. Kitekintés

A vizsgálatok időigénye és a határidő közelsége miatt a teljesség igénye nélkül csak 1-1 minta feldolgozására volt elegendő idő. A hidegrepedési érzékenység további vizsgálatához szükségesnek tartom további minták és azok csiszolatainak feldolgozását.

Érdekesnek tartom további hidegrepedés kimutatására alkalmas vizsgálatok alkalmazását (pl. Tekken-próba) illetve további hegesztőanyagok vizsgálatát. Továbbá pontosabb eredményeket kaphatnánk amennyiben a varrat diffúzióképes hidrogéntartalmát mérnénk (pl. higanyos módszerrel), nem az elektróda felvett nedvességtartalmát. A Shinozaki és kutatótársai által végzett vizsgálatok [13] alapján érdemes lenne a hőhátasövezet és varratfém ferrittartalmának mérése. Érdekesnek tartom továbbá a jelenleg használt akril festék helyett egy, alapozó festékkel bevont minta varratának vizsgálatát.

A hidrogén varratgeometriára való hatásának további vizsgálatára több hidrogénnel szennyezett minta feldolgozását tartom szükségesnek.

Budapest, 2021. november 7.

Breznay Csaba

Irodalomjegyzék

- [1] Outokumpu. History of duplex stainless steel. URL <https://www.outokumpu.com/en/expertise/2020/duplex-90-years/history-of-duplex-stainless-steel>. Megnyitva: 2021.10.22.
- [2] Mats Liljas, Pelle Johansson, Hui-Ping Liu, and Claes-Olof A. Olsson. Development of a Lean Duplex Stainless Steel. *Steel Research International*, 79(6):466–473, 2008. ISSN 1611-3683. DOI: 10.1002/srin.200806154.
- [3] SACIT. Equist acélkalauz. SACIT Acéltanácsadó Kft, Budapest.
- [4] Dr. Bödök Károly. Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére. CORWELD, 1997.
- [5] Avesta Welding. How to Weld Duplex Stainless Steels. URL <http://www.avestawelding.com/3756.epibrw>.
- [6] Marina Knyazeva and Michael Pohl. Duplex steels: Part i: Genesis, formation, structure. 2 (2):113–121, April 2013. DOI: 10.1007/s13632-013-0066-8. URL <https://doi.org/10.1007/s13632-013-0066-8>.
- [7] N. Bailey et al. Welding steels without hydrogen cracking. Abington Publishing and ASM International, 1973. Second edition.
- [8] P G Kumar and K Yu-ichi. Diffusible Hydrogen In Steel Weldments. *Transactions of JWRI*, 42(1):39–62, 2013. URL http://www.researchgate.net/publication/256499083_Diffusible_hydrogen_in_steel_welds_-_A_status_review/file/3deec52d8dbf163485.pdf.
- [9] Dr. Dobránszky János. Hegesztés előadásjegyzet. BME ATT, 2020/21/2.
- [10] Dariusz Fydrych and Jerzy Łabanowski. An experimental study of high-hydrogen welding processes. *Revista de Metalurgia*, 51(4), 2015. ISSN 19884222. DOI: 10.3989/revmetalm.055.
- [11] John C. Lippold. *Welding Metallurgy and Weldability*. John Wiley & Sons, Inc, January 2015. DOI: 10.1002/9781118960332. URL <https://doi.org/10.1002/9781118960332>.
- [12] ASM Handbook Committee. Asm handbook, welding brazing and soldering. ASM International, USA, 1993. Volume 6.
- [13] K SHINOZAKI, L KE, and T. NORTH. Hydrogen cracking in duplex stainless steel weld metal. *Welding Journal-New York*, 71(November), 1992. ISSN 0043-2296.
- [14] Marina Knyazeva and Michael Pohl. Duplex steels. part ii: Carbides and nitrides. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2(5):343–351, 2013. ISSN 21929262. DOI: 10.1007/s13632-013-0088-2.

- [15] Magyar Szabványügyi Testület. Fémek hegesztett kötéseinek roncsolásos vizsgálata. hegesztett alkatrészek hidegrepedés-vizsgálata. Ívhegesztési eljárások. 2. rész: Akadályozott zsugorodású próbatest vizsgálata... 25.160.40. MSZT, 2005. Címoldalas jóváhagyó közleménnyel bevezetett angol nyelvű szabvány.
- [16] Dr. Szunyogh László et al. Hegesztés és rokon technológiák. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007. Kézikönyv.
- [17] Dr. Béres Lajos et al. Hegesztési zsebkönyv. COKOM Mérnökiroda Kft, 1996.
- [18] Bernus Ferenc. Hegesztő mestervizsgára felkészítő jegyzet. Magyar Kereskedelmi és Iparkamara, Budapest, 2014.
- [19] Dr. Turi Aladár. Az acélhegesztés fizikai-kémiai folyamatai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986.
- [20] Alberto Ruiz, Kevin Jesús Fuentes-Corona, Victor H. López, and Carlos A. León. Microstructural and ultrasonic characterization of 2101 lean duplex stainless steel welded joint. *Applied Acoustics*, 117:12–19, 2017. ISSN 1872910X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.10.018. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.10.018>.