

Miskolci Egyetem  
Gépészmérnöki és Informatikai Kar  
Anyagszerkezetten és Anyagtechnológiai Szekció



**Nagyszilárdságú szerkezeti acélból készült hegesztett  
kötések vizsgálata ismétlődő igénybevételek esetén**

Németh László, Z0MR4V  
6065, Lakitelek  
Béke u. 13.

## Tartalom

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés.....                                                      | 3  |
| 2. Nagyszilárdságú acélok hegeszthetősége.....                         | 4  |
| 2.1 A nagyszilárdságú acélok ismertetése.....                          | 4  |
| 2.2 A nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének problémái.....         | 6  |
| 2.3 Nagyszilárdságú acélok fáradási tulajdonságai.....                 | 8  |
| 3. Hegesztéstechnológia tervezése.....                                 | 10 |
| 3.1.1 Alapanyag.....                                                   | 10 |
| 3.1.2 Hozaganyag.....                                                  | 11 |
| 3.1.3 Védőgáz.....                                                     | 11 |
| 3.2 Hegesztési paraméterek.....                                        | 11 |
| 3.2.1 Vonalenergia hatása.....                                         | 11 |
| 3.2.2 Előmelegítési hőmérséklet.....                                   | 13 |
| 3.2.3 Karbonegyenérték és előmelegítési hőmérséklet meghatározása..... | 13 |
| 3.2.4 Hűlési idő.....                                                  | 14 |
| 3.2.5 Hűlési idő mérése.....                                           | 15 |
| 3.3 Hegesztési paraméterek meghatározása.....                          | 17 |
| 3.4 Hegesztési próbák elkészítése.....                                 | 18 |
| 3.4.1 Hegesztett kötés kialakítása.....                                | 19 |
| 3.4.2 Hegesztési próbák elkészítése.....                               | 20 |
| 3.4.3 K kötés kialakítás.....                                          | 22 |
| 4. Megfelelőséget tanúsító anyagvizsgálatok.....                       | 23 |
| 4.1. Roncsolásos anyavizsgálatok.....                                  | 23 |
| 4.1.1 Makro csiszolat elkészítése.....                                 | 23 |
| 4.1.2 Keménységvizsgálat.....                                          | 24 |
| 4.2 Szakítóvizsgálat.....                                              | 26 |
| 4.2.1 Eredmények összehasonlítása.....                                 | 27 |
| 4.3 Nagyciklusú fárasztóvizsgálat.....                                 | 29 |
| 4.3.1 Nagyciklusú fárasztóvizsgálatra alkalmazott próbatest.....       | 29 |
| 4.3.2 Vizsgáló berendezés.....                                         | 30 |
| 4.3.3 Vizsgálati eredmények értékelése.....                            | 32 |
| 4.4 Fáradásos repedésterjedés.....                                     | 37 |
| 4.4.1 Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatához.....           |    |
| alkalmazott próbatestek.....                                           | 38 |
| 4.4.2 A vizsgálati eredmények meghatározása.....                       | 42 |
| Következtetések.....                                                   | 47 |
| Irodalomjegyzék.....                                                   | 49 |
| Köszönetnyilvánítás.....                                               | 51 |
| MELLÉKLET.....                                                         | 52 |

## 1. BEVEZETÉS

Az egyre növekvő felhasználói igények a 20. század folyamán szükségessé tették új acéltípusok kifejlesztését. Dolgozatom ezen típusok közül a nagyszilárdságú acélok körével, azon belül pedig a nemesített nagyszilárdságú acélokkal foglalkozik. Az ismertetésre kerülő vizsgálatokhoz, kísérletekhez S960QL jelölésű acélból készült hegesztett kötéseket, valamint az azokból készült próbatesteket használtam fel. A nemesített nagyszilárdságú acélok kiváló mechanikai és szerkezeti tulajdonságaikról ismertek. Ezek a nagy szilárdság, a mérsékelt karbon tartalom, a kiváló ellenállás a bemetsző hatásokkal szemben, valamint az elfogadható hegeszthetőség és alakíthatóság. Ezen kitűnő tulajdonságaik miatt a nagyszilárdságú acélok széles körben használatosak, úgy, mint személygépkocsi karosszériaelemek, bányászati eszközök, emelőgép szerkezetek, kotrógép kanalak, toronyházak elemeiként. Hiába tekintjük viszonylag jól hegeszthetőnek a nagyszilárdságú acélokat, mégis különös figyelmet kell fordítanunk a hegesztő eljárás és a hegesztési paraméterek megválasztására [1]. Dolgozatom során kitérek több vizsgálati módszerre és azok alkalmazására, amelyek között hagyományos anyagvizsgálati eljárások és korszerű, törésmechanikai vizsgálatok egyaránt találhatók.

A dolgozat készítésekor aktív védőgázos fagyóelektródás ívhegesztéssel (ISO kód: 135) hegesztési kísérleteket végeztünk S960QL jelű, nemesített nagyszilárdságú acélon. A hegesztett kötés keménység-eloszlásának megállapítására makrokeménység mérést végeztünk (HV10). Ahhoz, hogy össze tudjam hasonlítani a készített kötés szakítószilárdságát és folyáshatárát az alapanyagéval, szakítóvizsgálatokat hajtottunk végre, a próbatestre helyezett finomnyúlásmérő segítségével. A hagyományos anyagvizsgálati eljárások mellett nagyciklusú fárasztóvizsgálat (HCF) és fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálat (FCG) elvégzésével elemeztem a hegesztett kötések fáradási tulajdonságait. Fáradási szilárdsági görbét határoztam meg,  $R = 0,1$  terhelési feltételre, majd a kapott eredményeket összevetettem szakirodalmi adatokkal. A fáradásos repedésterjedés esetén elemeztem a kapott repedésterjedési görbéket, összevettem azok paramétereit az alapanyagkorábban meghatározott értékekkel.

## 2. NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTHETŐSÉGE

### 2.1 A nagyszilárdságú acélok ismertetése

Elsőként definiálni kell a nagyszilárdságú acélok különböző fajtáit. A normalizálás útján maximálisan elérhető 460 MPa folyáshatár a hetvenes évek folyamán megjelent és azóta, a fejlődő termikus és termomechanikus eljárásokkal nagyban növelhető. A legnagyobb szilárdsággal rendelkező szerkezeti acélokat az MSZ EN 10025-6 szabvány szerint Q jelöléssel látják el, ami a nemesítési technológia részét képező edzésre utal. Az említett szabvány nagyszilárdságúnak tekinti a 460 MPa és a 960 MPa közötti folyáshatárral rendelkező acélokat. Az 1. táblázatban a szerkezeti acélok egy lehetséges csoportosítási módja látható [20].

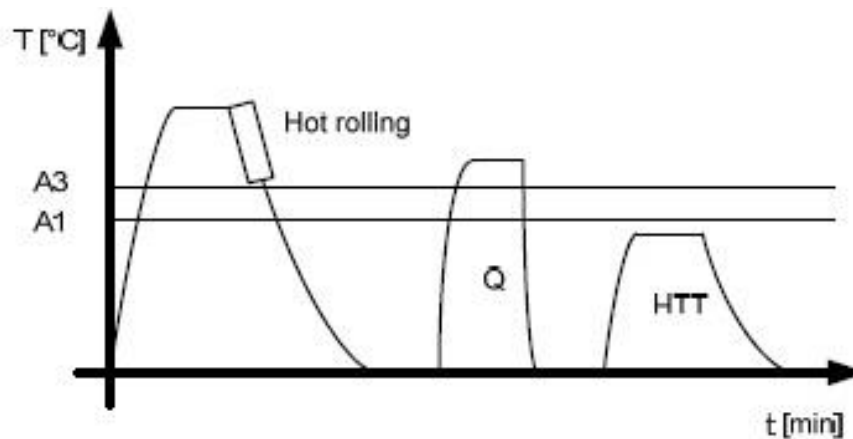
| $R_e < 355$<br>[MPa] | $355 \leq R_e \leq 600$<br>[MPa] | $600 \leq R_e \leq 960$<br>[MPa] | $960 < R_e$<br>[MPa]  |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Kis szilárdságú      | Közepes szilárdságú              | Nagyszilárdságú                  | Extra nagyszilárdságú |

1. táblázat: Szerkezeti acélok csoportosítása folyáshatár alapján

A fenti táblázatból következik, hogy viszonylag széles folyáshatár tartományban beszélhetünk nagyszilárdságú acélokról. Napjainkban használatos acélok között előfordul olyan típus is, amelynek folyáshatára eléri az 1300 MPa-t.

A nagyszilárdságú acélok alkalmazásának előnyét jelenti a vékonyabb szelvényátmérőkkel elérhető alapanyag, valamint az ebből adódó, a varratméret csökkenésével elérhető hozaganyag megtakarítás a hegesztett szerkezet gyártása folyamán. Azért, hogy a kimagasló szilárdsági tulajdonságokat elérjék, különböző termikus vagy termomechanikus eljárásokat kell alkalmazni, amelyek a hegesztés szempontjából sokszor előnytelenek. Napjaink acélfejlesztési tendenciáinak tanulmányozásakor sok esetben nem is a szilárdság növelése, hanem az alakváltozó képesség megőrzése, esetleges javítása az acélgyártók legnagyobb kihívása.

A nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok kedvező mechanikai tulajdonságai az acélgyártási folyamatnak köszönhetők, amelyet az 1. ábra szemléltet.



**1. ábra:** A (Q+T) nemesített nagyszilárdságú acélok gyártási folyamata [2]

Ahogy az az 1. ábrán láthatjuk, egy, az  $A_3$  hőmérséklet feletti meleghengert követően viszonylag lassú hűtési sebességet alkalmazva szobahőmérsékletre hűtik a hengerelt acéllemezt. Ezt követően újra felhevítik  $A_3$  hőmérséklet fölé, majd itt rövid időn át hőtartják, míg a teljes keresztmetszet ausztenites szerkezetűvé nem válik. Ezt követően egy igen intenzív hűtést, rendszerint vízűtést, alkalmaznak. Emiatt a hűtési forma miatt gyakran „vizedzésű” nagyszilárdságú acélokként emlegeti a szakirodalom ezen csoportot, valamint az alacsony karbontartalom miatt sokszor „vakedzett” jelzővel illetik őket. Az átédzhetőség növelése érdekében, az átalakulási diagramokat jelentősen jobbra toló ötvözőket adagolnak ezekhez az acélokhoz, ilyenek például a króm, valamint a molibdén. Az edzést követően a megeresztési szakaszban  $A_1$  hőmérséklet alá hevítik az acéllemezt, amely majd egy hőtartást követő, lassú lehűtés folyamán nyeri el végleges szövetszerkezetét. Ennek a technológiának és az ötvöző tartalomnak köszönhetően az acél kimagasló szilárdsági, és megfelelő szívóssági tulajdonságokkal bír.

Másik, napjainkban elérhető megoldás direkt edzés (QC) néven ismert, amely eljárást a RUUKKI acélgyártó cég fejlesztette ki, költségmegtakarítás és más előnyök céljából. Ezen eljárás folyamán a meleghengert követően közvetlenül intenzív hűtéssel edzésnek (a már korábban említett „vakedzésnek”) vetik alá a lemezeket. Következő lépésben egy jóval az  $A_1$  hőmérséklet alatti, alacsony hőmérsékletű megeresztést alkalmaznak. Így az 1. ábrán szemléltetett három hőciklus helyett csak kettőn megy keresztül az acéllemez; szövetszerkezete tisztán martenzites és bainites, kiválások pedig alig fordulnak elő benne [4][8].

## 2.2 A nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének problémái

A nemesíthető nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének problémái elsősorban a nem-egyensúlyi szövetszerkezetből adódnak, amelyek legfőképpen az anyag előállításakor alkalmazott különleges gyártástechnológiának tudhatóak be.

A megfelelő hegesztéstechnológia kidolgozása előtt számolnunk kell több lehetséges problémával is. Ilyen például a hidegrepedések megjelenésének veszélye, a hőhatásövezet inhomogenitása – előfordulhat olyan zóna ahol akár 20%-kal is kisebb lehet a keménység, és ebből következően a szilárdság is az alapanyagétól –, többsoros varratfelépítés esetén, pedig az újabb sorok megeresztő hatása okozhat kilágylást. A szilárdságcsökkenés mellett igen jelentős probléma még a keményedés is, amely helytelen paraméterek esetén akár 450 HV feletti keménységet is jelenthet. A helytelen paraméterek megválasztása és a túlzott hőbevitel a hegesztett kötés szívósságának csökkenéséhez is vezethet [2].

Legjelentősebb, és a hegesztők, hegesztőmérnökök számára elsődleges veszélyt jelentő probléma a különböző típusú repedések keletkezésének lehetősége. Hegesztéskor a helyi felhevülés miatt jelentős alakváltozás jön létre. A létrejövő hőfolyamat hatására az  $A_1$  fölé hevült ötvözetek lehűlés közben időben változó alakváltozó képességgel rendelkeznek. Ha ezen alakváltozó képesség kisebb, mint a létrejött alakváltozás akkor repedés keletkezik. A repedések kifuthatnak a felületre, de elhelyezkedhetnek a felület alatt is. A felületre kifutó hibák törésmechanikailag veszélyesebbek, mint a felület alattiak. Az előbbieket roncsolásmentes vizsgálatokkal megbízhatóan ki lehet mutatni, viszont a felület alatt húzóódokat csak pontatlanul, vagy nehezen, így nagy hangsúlyt kell fektetni a helyes technológiai tervezésre. Ki kell hangsúlyozni továbbá azt is, hogy bár a repedések többnyire kimutathatók roncsolásmentes anyagvizsgálatokkal, a túlzott hőbevitel miatt kialakuló szívósságcsökkenés azonban rejtve marad.

Keletkezési folyamat szerint a következő repedéstípusokról beszélhetünk:

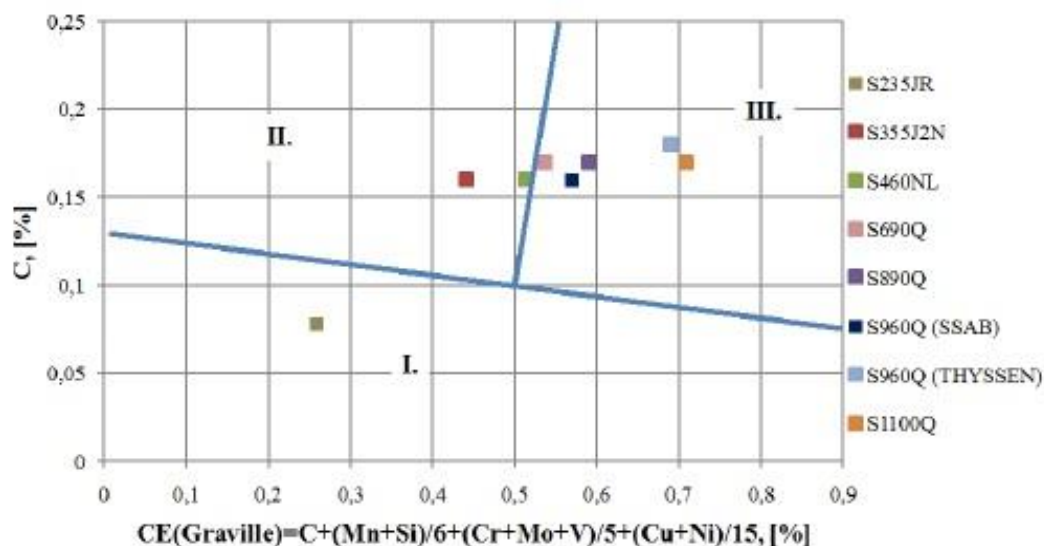
- melegrepedésről (kristályosodási, likvációs),
- a diffúzió képes hidrogén hatásával összefüggő hidegrepedésről,
- teraszos repedésről.

A kristályosodási repedés fő oka a dermedés során az ötvözők megoszlása, valamint a szennyezők dúsulása miatt létrejövő folyékony hártya, ami a szemcsehatárokat borítja [4]. Nagyszilárdságú acélok esetén a kristályosodási repedések megjelenésével rendszerint nincs

különösebb problémánk, mivel az acélgyártók a repedések elhárítása érdekében igen nagy figyelmet fordítanak a szennyezők csökkentésére, valamint az ötvözők homogenitására. A melegrepedések megjelenésének rendszerint kis kockázata van, bár előfordulnak olyan speciális esetek, amikor rézzel történő ötvözéssel növelik a mechanikai tulajdonságokat (ez a hozzáadott réz, ha nem megfelelő mennyiségben adagolják az acélhoz, akkor igen nagy hibaforrást jelenthet) [30]. Problémát jelenthet a hőhatásövezet inhomogenitása, amelyet az alapanyagban előforduló különböző ötvözők, a hegesztés hőciklusa miatt történő, visszafordíthatatlan megváltozása okozhat. Igen összetett hőhatásövezet alakulhat ki, amelynek  $A_1$  hőmérséklet felé hevült részei egy részben megolvadt, durvaszemcsés, finomszemcsés és egy részlegesen átkristályosodott, más néven interkritikus zónából áll. A durvaszemcsés övezet hajlamos a leginkább az edződésre, ebből kifolyólag jelentős hidrogéntartalom esetén igen fogékony a hidegrepedésekre. A hidegrepedési hajlammal a nagyszilárdságú acélok esetében fokozottan számolnunk kell. Ez a jelenség három tényező együttes hatására vezethető vissza:

- szövetszerkezet, valamint annak keménysége;
- a hőhatásövezet varrattal határos részének és a varratfémnek a diffúzióképes hidrogéntartalma;
- a repedések terjedéséhez szükséges húzófeszültségek.

A szövetszerkezettel kapcsolatos hidegrepedési hajlam összefüggésben van a karbonegyenértékkel. Ez a szám egyesíti a karbontartalom, valamint más, az edződési hajlamra hatással bíró ötvöző elemek hatását. A karbontartalom, valamint a szilíciumot is tartalmazó karbonegyenérték kapcsolatát a Graville diagram (2. ábra) fejezi ki, amelynek alapján a hegeszthetőség szempontjából három csoportba sorolja az acélokat [3]. Az I. övezetbe tartozó acélok problémamentesen hegeszthetők. A II. övezet acéljait alulról korlátozott hőbevitellel szükséges hegeszteni, míg a III. övezet acéljai a limitált hőbevitel mellett, előmelegítés alkalmazásával hegeszthetők. A diagram alapján a nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez szabályozott vonalenergiájú technológiát és előmelegítést kell alkalmazni. A szabályozott kis vonalenergiájú technológia előnyös, mivel az alkalmazásával garantálhatóak az acél megkívánt szilárdsági és szívóssági tulajdonságai.



2. ábra: Graville diagram [2]

A diffúzióképes hidrogéntartalom kiküszöbölésére salakvédelmű hegesztő eljárások esetén jól szárított, bázikus salakot adó heganyagot kell választani. A varratba került esetleges hidrogéntartalom csökkentésére hegesztést közvetlenül követő 100...150 °C-os hőkezelés alkalmas, amelyet általában csak vastagabb ( $s > 30$  mm) lemezeknél szoktak alkalmazni. A varratra merőleges húzófeszültségek szintén hozzájárulnak a hidegrepedések megjelenésének. Ebből adódóan kerülnünk kell a nagyobb falvastagságot és az alakváltozást gátló merev szerkezetet. Viszont, ha ez nem kivitelezhető, akkor növelnünk kell az előmelegítési hőmérsékletet [3][5].

### 2.3 Nagyszilárdságú acélok fáradási tulajdonságai

Napjainkban még számos kérdés felvetődik a nagyszilárdságú acélok kis-, és nagyciklusú fáradási tulajdonságaival kapcsolatban. Ezt jelzi az is, hogy sokáig a EUROCODE 3 fáradásra történő méretezéssel foglalkozó fejezetei nem foglalkoztak a nagyszilárdságú acélok ezen tulajdonságaival. Majd 2006-ban, előrelépésként, megjelent a EUROCODE 3 12. fejezete, amely lehetővé tette az  $R_m/R_e$  arányra és a törésig elviselt nyúlásra vonatkozó kevésbé szigorú előírások által, az előírásban levő összefüggések alkalmazását nagyszilárdságú acélok fáradásra történő méretezéséhez, 700 MPa folyáshatárig [11]. Ennek ellenére a megengedhető feszültség maximum továbbra is 160 MPa maradt, amely eredetileg a 240 MPa folyáshatárú acélok legnagyobb lüktető kifáradási határa volt [20].

Ezzel szemben a Nemzetközi Hegesztési Intézet előírásai helytállóbbak, mivel a fáradási tulajdonságok meghatározására vonatkozó összefüggések 960 MPa folyáshatárig érvényesek. Számos projekt foglalkozott és jelenleg is foglalkozik a nagyszilárdságú acélok fáradási

tulajdonságaival, eredményeik pedig további gondolkodásra adhatnak okot, mivel az esetek többségében a fáradási szilárdság értéke jóval a megengedett érték felett van [23][24]. Látható az egyes projektek eredményeiből, hogy a nagyszilárdságú szerkezeti acélok nem viselkednek rosszabbul a fáradással szemben, hanem kedvezőbb fáradási tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a hagyományos szerkezeti acélok.

Lényegében megállapítható az, hogy a fáradásnak kitett szerkezeti elemek méretezése során, ha a EUROCODE 3 szerint járunk el, akkor nem tudjuk az acél előnyös tulajdonságait kihasználni. A nagy szilárdság előnyeit statikus (kvázistatikus), azaz folyáshatárra történő méretezésnél lehet igazán kihasználni. Tehát az ezekkel a kérdésekkel foglalkozó szakembereknek szükségük van a EUROCODE 3 alapos felülvizsgálatára. Emellett kellő mennyiségű, megbízható információra van szükség a nagyszilárdságú acélok illetve a belőlük készült kötések fáradási tulajdonságairól és arról, hogy miként viselkednek dinamikus terhelés alatt a hagyományos acélokhöz képest.

Amennyiben egy fáradásnak kitett szerkezetben nagyszilárdságú szerkezeti acélt szeretnénk alkalmazni, akkor a termikus és mechanikus utókezelések jelentősége megnő. Egyes esetekben a fáradási szilárdság értékét akár 50%-kal is meg lehet növelni utólagos kezelések alkalmazásával. A legsikeresebb utólagos kezeléseknek az ultrahangos kezelések, valamint az SWI (141) újraolvasztás bizonyulnak [25][26]. Ezek tulajdonképpen a maradó feszültség csökkentési módszerek közé sorolhatóak. További, gyakran alkalmazott utólagos kezelések:

- SWI/plazmaíves kezelés;
- szemcseszórás;
- vibrációs feszültségcsökkentés;
- varratátmenetek köszörülése;
- ultrahangos eljárások;
- kalapálás, „túkalapálás” [20].

### 3. HEGESZTÉSTECHNOLÓGIA TERVEZÉSE

A nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok több hegesztő eljárással is hegeszthetők (BKI, VFI, FH, lézer). A legnagyobb rendelhető lemezvastagság 960 MPa garantált folyáshatárú acélok esetében 50 mm, ezért célszerű lehet vastagabb lemezek hegesztéséhez fedett ívű eljárást alkalmazni. Ebben az esetben nagy hangsúlyt kell fektetni a fedőpor megfelelő megválasztására, mivel felmerülhet annak a veszélye, hogy a fedőporral járó esetleges nedvességtartalom hidrogént juttat a varratba, ami pedig hidegrepedést okozhat. Ebből következik, hogy nagyon fontos szempont az eljárás megválasztása mellett a megfelelő hozaganyag és védőgáz kiválasztása. Ezen szempontok mellett magának a hegesztés folyamatának és az alapanyag előkészítésének a módját is definiálni kell ahhoz, hogy a különböző igényeknek megfelelő legyen a kész kötés. Az ipari gyakorlat során szerzett tapasztalatok alapján a vizsgálati kötések elkészítéséhez az MSZ EN ISO 4036 szerinti, 135 kódjelű, aktív védőgázos fogyóelektrodás ívhegesztést alkalmaztam. A fedett ívű hegesztés (121) mellett ezt az eljárást alkalmazzák a FORTACO Zrt.-nél, valamint több szakirodalom is ezt javasolja nagyszilárdságú acélok hegesztésére. Az ismertetésre kerülő hegesztéstechnológiáról készült pWPS a mellékletben található.

#### 3.1.1 Alapanyag

A felhasznált alapanyag a svéd SSAB Oxelöstund által gyártott WELDOX 960 E jelű nemesített, nagyszilárdságú szerkezeti acél (MSZ EN ISO 10025-6 szabvány szerinti S960QL besorolás). Az acél jellemző mechanikai tulajdonságait a 2. táblázat, a vegyi összetételre vonatkozó adatokat pedig a 3. táblázat tartalmazza, a gyártói műbizonylat alapján.

| WELDOX<br>960 E | R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | R <sub>m</sub><br>[MPa] | A <sub>5</sub><br>[%] | KV (-40 °C)<br>[J] |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
|                 | 1007                       | 1053                    | 16                    | 105                |

2. táblázat: A WELDOX 960 E jelű acél alapanyag jellemző mechanikai tulajdonságai a gyártói műbizonylat alapján

| WELDOX<br>960 E | C      | Si      | Mn     | P      | S       | Cr      | Ni      |
|-----------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                 | 0,16 % | 0,23 %  | 1,25 % | 0,008% | 0,001 % | 0,2 %   | 0,04%   |
| Mo              | V      | Ti      | Cu     | Al     | Nb      | B       | N       |
| 0,605 %         | 0,04 % | 0,004 % | 0,01 % | 0,06 % | 0,016 % | 0,001 % | 0,003 % |

3. táblázat: A WELDOX 960 E jelű acél vegyi összetétele a gyártói műbizonylat alapján

### 3.1.2 Hozaganyag

A WELDOX 960-as alapanyaghoz matching elven választottam hozaganyagot, azaz a cél az volt, hogy a varrat folyáshatára közel azonos legyen, mint az alapanyagé. A felhasznált lemez 20 mm vastagságú volt, ehhez az ajánlott huzalátmérő a DIN EN ISO 16834 szabvány szerint 1,2 mm. Az így kiválasztott hozaganyag a BÖHLER UNION X96 (EN 12534:2000 G 89 5 M Mn4Ni2, 5CrMo) típusú, közepesen ötvözött huzalelektroda, amely nagy szilárdsága ellenére jó alakváltozó képességgel bír, ráadásul hidegrepedésekkel szemben ellenálló kötést eredményez. Napjainkban ez a piacon elérhető legnagyobb szilárdságú huzalelektroda, amelyet a nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez ajánlanak. A műbizonylaton szereplő mechanikai tulajdonságait a 4. táblázat, vegyi összetételét pedig az 5. táblázat tartalmazza.

| UNION X96 | $R_{p0,2}$<br>[MPa] | $R_m$<br>[MPa] | $A_5$<br>[%] | KV (-40 °C)<br>[J] |
|-----------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|
|           | 930                 | 980            | 14           | 40                 |

*4. táblázat: A UNION X96 jelű hozaganyag minimálisan megkövetelt mechanikai tulajdonságai a gyártói műbizonylat alapján*

|              |              |              |               |               |               |               |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| UNION X96    | C<br>0,11 %  | Si<br>0,76 % | Mn<br>1,9 %   | P<br>0,01 %   | S<br>0,009 %  | Cr<br>0,35 %  |
| Mo<br>0,57 % | Ni<br>2,23 % | V<br>0,004 % | Cu<br>0,002 % | Ti<br>0,057 % | Zr<br>0,001 % | Al<br>0,002 % |

*5. táblázat: A UNION X96 jelű hozaganyag vegyi összetétele a gyártói műbizonylat szerint*

### 3.1.3 Védőgáz

Védőgázként, több szakirodalom ajánlására [4][13], az MSZ EN 1417:2008 szerinti M21 jelölésű gázkeveréket alkalmaztam; a választott védőgáz a CORGON 18 (18% CO<sub>2</sub> + 82% Ar) volt. A kevert védőgáz alkalmazása mély beolvadású varratképződést eredményez, arányos koronamagassággal. Ilyen varratlagnál csökken a melegrepedés veszélye.

## 3.2 Hegesztési paraméterek

### 3.2.1 Vonalenergia hatása

A vonalenergia az egyik legfontosabb, legnagyobb hatású hegesztési paraméter, amelyet a technológia tervezése folyamán figyelembe kell venni. A vonalenergia a hőáram segítségével fejezhető ki, amely az ívfeszültség ( $U_{iv}$ ), a hegesztőáram ( $I_h$ ) és a fázisszög szorzata ( $\cos\varphi$ ) (1) [16].

$$\phi = U_{iv} \cdot I_h \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

Mivel a későbbiekben bemutatásra kerülő kísérletek folyamán egyenáramú berendezést alkalmazok, így az áram és a feszültség közötti  $\varphi$  fázisszög zérus, tehát az (1)-es összefüggés egyszerűsödik, mivel  $\cos\varphi = 1$ . Az (1)-es képletet felhasználva a következő módon kaphatjuk meg a vonalenergiát kifejező összefüggést (2):

$$E_v = \frac{\eta \cdot \phi}{f \cdot v_h} [kJ/mm] \quad (2)$$

A vonalenergia a hőáram és a hegesztési sebesség ( $v_h$ ) hányadosaként számítható. A számlálóban szereplő  $\eta$  tényező a termikus hatásfokot jelenti, amely a hőforrás hőenergiájának a hegesztett darabba kerülő hasznos részét fejezi ki. Ez védőgázos fagyóelektrodás ívhegesztés esetén megközelítőleg  $\eta = 0,8$ . Az összefüggésben szereplő  $f$  formatényező a hegesztett kötés geometriai jellegzetességeit foglalja magában. A vonalenergia csökkentésével tarthatók az alapanyag szilárdsági paraméterei, viszont ez a megoldás a termelékenység rovására megy.



**3. ábra:** Vonalenergia hatása [12]

Az S960QL jelű acél hegesztése esetén a lehető legkisebbre kell választani a vonalenergia mértékét, ellenkező esetben csökken a kötés szilárdsága. Nagyszilárdságú acélok esetében a legkedvezőbb mechanikai tulajdonságok, lemezvastagságtól függően, rendszerint 1000 J/mm-t nem meghaladó vonalenergia betartásával érhetőek el; következtetésképpen az ilyen acélok hegesztését csak olyan hegesztő végezheti, aki a hőfolyamatokat kontrollálni tudja. Ellenkező esetben a varrat-alapanyag átmenetnél lassú lehűlés esetén csökkenhet a keménység, gyors

lehűlés esetén pedig keménységcsúcsok alakulhatnak ki (az anyag edződik és elveszíti szívósságát, vagy kilágyul és szilárdsága csökken) [15][16].

### 3.2.2 Előmelegítési hőmérséklet

A nagyszilárdságú szerkezeti acélokban az ötvözők hatása miatt a varrat-alapanyag átmeneteknél keménységcsökkenés és keménységcsúcsok is egyaránt kialakulhatnak. Hegesztés során a keményedés elkerülése miatt szükséges előmelegítést alkalmazni. Az előmelegítés segítségével megakadályozzuk a varrat és a hőhatásövezet edződését, így csökkentjük a hegesztett kötésben a hidegrepedési veszélyt. Továbbá, az előmelegítés alkalmazásával kedvezőbb körülményeket biztosítunk a hidrogén eltávozására a hegyanyagból. Az előmelegítés segítségével csökkenteni tudjuk a hegesztett kötés hűlési sebességét, ezáltal a martenzit tartalom is csökken, ami kisebb ridegséget fog eredményezni. Az előmelegítés hatására mérséklődik a hőtágulás, és kisebb belső feszültség keletkezik, mivel a varrat és az alapanyag nagyobb tartományban hűlnek együtt.

Az előmelegítés az alábbi esetekben különösen fontos:

- Gyöksor elkészítésekor és a fűzővarratok esetében; a nagyobb hőmérséklet kedvezően befolyásolja hegesztés közben és utána a hidrogén távozását az anyagból.
- Az anyagvastagság növelésével az előmelegítési hőmérsékletet is növelni kell, ezáltal kompenzálható a gyorsabb hűlés,
- Ha a hegesztett szerkezet kialakítása, befogása, rögzítése merevebb, növelni kell az előmelegítési hőmérsékletet.
- A lecsapódó pára miatt, ami diffúzióképes hidrogén bevitelét segíti elő, szintén alkalmazni kell előmelegítést, ha a környezeti hőmérséklet +5 °C, vagy az alatt van. [15]

Gyakorlati tapasztalatok szerint a rétegek közti hőmérséklet nem lehet sokkal magasabb (sőt sok esetben kisebb), mint az előmelegítési hőmérséklet, tehát a különböző varratsorok között meg kell várni, hogy a varrat visszahűljön legalább az előmelegítési hőmérsékletre.

### 3.2.3 Karbonegyenérték és előmelegítési hőmérséklet meghatározása

Széles körben elterjedt hűlési idő számítási eljárás az úgynevezett Uwer-Höhne módszer, amelyet az MSZ EN 1011-2 szabvány is tartalmaz. Ez az előírás az alábbi karbonegyenérték összefüggést használja:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (3)$$

A CET összefüggés alkalmazási tartománya CET = 0,2-0,5%, az egyes elemek (ötvözők) tartományait, illetve maximális mennyiségeit a 6. táblázat tartalmazza.

| C                                      | Si  | Mn      | Cr  | Cu  | Ni  | Mo   | V    | Nb   | Ti   | B     |
|----------------------------------------|-----|---------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| Tartomány vagy maximális érték, tömeg% |     |         |     |     |     |      |      |      |      |       |
| 0,05-0,32                              | 0,8 | 0,5-1,9 | 1,5 | 0,7 | 2,5 | 0,75 | 0,18 | 0,06 | 0,12 | 0,005 |

**6. táblázat:** A CET alkalmazásakor az egyes elemek mennyiségei

Figyelembe kell venni az előmelegítési hőmérséklet számításakor a diffúzióképes hidrogéntartalmat, a kombinált lemezvastagságot, valamint a vonalenergiát is. Így az előmelegítési hőmérséklet számítására szolgáló képlet a következő módon alakul:

$$T_{pre} = 697 \cdot CET + 160 \tanh \cdot \left( \frac{s}{35} \right) + 62 \cdot H_d^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot E_v - 328 \quad (4)$$

ahol:

s – kombinált lemezvastagság ( $s_1 + s_2$ ), [mm]

$H_d$  – diffúzióképes hidrogéntartalom, [ml/100g fém]

$E_v$  – vonalenergia, [kJ/mm]

Az előmelegítés mértékét a varrat középvonalától legalább 75 mm széles sávban ki kell terjeszteni [18]. Az előmelegítés elvégezhető elektromos melegítő paplanok segítségével. Amennyiben ez az eszköz nem áll rendelkezésre, alkalmazható oxigén-acetilén gázzal működő melegítő égő is. A hegesztés megkezdése előtt hőkrétával, vagy tapintós hőmérővel ellenőrizni kell a hőmérséklet megfelelőségét.

### 3.2.4 Hűlési idő

A vegyi összetételen kívül jelentős szerepe van a hűlési időnek is a repedésképződésben. A hűlési szakasz jellemzésére, a hűlési sebesség helyett, a  $t_{8/5}$ -ös hűlési idő használatos. A hegesztési folyamat hűlési fázisát az  $A_3$  hőmérsékletről (karbontartalomtól függően 800-850 °C közé tehető) 500 °C-ra történő hűlési idővel szokták jellemezni. Azért szokás ezt a hőmérséklet tartományt vizsgálni, mert a nagyszilárdságú acélokban az ausztenit bomlása 850-500 °C közötti tartományban megy végbe. A hűlési idő több tényezőtől is függ: hatással van rá a vonalenergia, az előmelegítés hőmérséklete, a hegesztett kötés hővezetési tulajdonságai, a kötés vastagsága, a hővezetésben résztvevő elemek száma, illetve azok kiterjedése. A varrat mechanikai tulajdonságait elsősorban a kémiai összetétel, valamint a

kristályosodási sebesség és a kristályosodási képesség határozza meg. A hőhatásövezet mechanikai tulajdonságainak alakulásában nagy szerepe van a hegesztés során elért csúcshőmérsékletnek, az ausztenites tartományban töltött időnek és az abból való hűlési sebességnek.

Amint az említésre került, a hűlési sebesség mértéket nagyban befolyásolja a kötés kialakítása, valamint a hővezetésben résztvevő elemek száma és mérete. Ezen tulajdonságok alapján beszélhetünk kétdimenziós hővezetésről vékony lemezek esetében, illetve háromdimenziós hővezetésről vastag lemezek esetén. Az (5) összefüggés segítségével kiszámíthatjuk azt a határlemez vastagságot, amely elkülöníti a különböző hővezetési modelleket. Ha  $t < d_{\text{hat}}$ , akkor 2D-s számítást, ha  $t > d_{\text{hat}}$ , akkor pedig 3D-s számítási módot alkalmazunk.

$$d_{\text{hat}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{0,043 - 0,000043 \cdot T_0}{0,67 - 0,0005 \cdot T_0} \cdot E_v \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{850 - T_0} \right)} \quad (5)$$

Mivel a kísérleteim során 20 mm vastagságú lemezzel dolgoztam, az előzetes számítások bebizonyították, hogy az alkalmazott vonalenergia és hőmérséklet tartományban a háromdimenziós hővezetési modellt kell alkalmaznom.

$$t_{8,5/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot E_v \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{850 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad (6)$$

A (6) összefüggésben szereplő adatok a következők:

$T_0$  – előmelegítési hőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$E_v$  – vonalenergia [kJ/mm]

$F_3$  – alaktényező

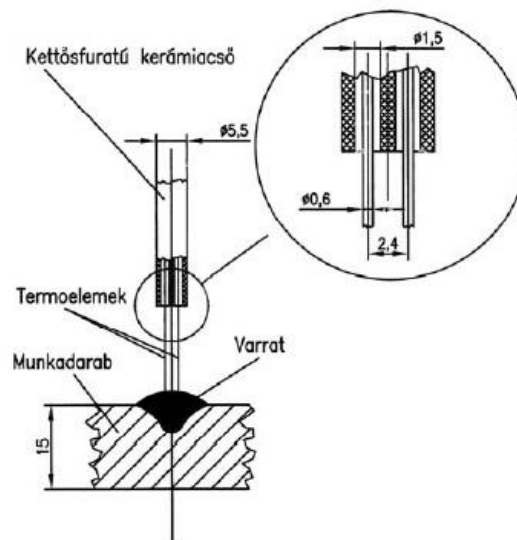
Az  $F_3$  formatényező kiválasztására vonatkozó táblázat a szakirodalomban, illetve az MSZ EN 1011-2 szabványban megtalálható. [19]

### 3.2.5 Hűlési idő mérése

Tapasztalatok azt bizonyítják, hogy a hegesztési paraméterek ( $U$ ,  $I$ ,  $v_h$ ) megváltozása jelentősen befolyásolja a  $t_{8/5}$ -ös hűlési idő mértékét, azonban a paraméterek betartására, valamint folyamatos ellenőrzésére nincs mindig lehetőség. A (6) összefüggés segítségével kiszámolható ugyan a hűlési idő, de a benne szereplő paraméterek nem elég pontosak ahhoz, hogy teljesen megbízható hűlési idő értéket kapjunk. Ahhoz, hogy a hegfürdőben és az azt

követő szilárdulás során zajló hűlési idő meghatározása pontos legyen, speciális termoelektromos eszközök nyújtanak segítséget.

A dolgozatban bemutatásra kerülő hegesztett kötések elkészítésekor a FORTACO Zrt. egyik ilyen berendezését használtam, annak érdekében, hogy az analitikus úton kiszámított értékek pontosságát alá tudjam támasztani.



**4. ábra:** Hűlési idő mérésének elve [15]

A méréskor a műszer termoelemeit (Cr-CrNi) a hegfürdőbe kell mártani és megszilárdulásig benne hagyni. A folyamat során a kijelzőn nyomon követhető a pillanatnyi hőmérséklet, a mérés végeztével pedig leolvasható a vizsgált pontra vonatkozó  $t_{8/5}$  hűlési idő. Az általam eredményesen meghatározott hűlési idő igazolta az előzetes számítások helyességét. Az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben, egy korábban készült dolgozat kísérletei során szintén alkalmazták a műszert, a mérési eredmények akkor is jól mutatták a számítások megbízhatóságát [20]. A mérési elv a 4. ábrán látható, a mérés menete pedig a következő.

- Az előre leszábot huzaldarabokat a mérő tapintó hátsó végén bevezetjük addig, amíg kb. 100 mm lóg ki a tapintó elülső részén. Ügyelni kell arra, hogy a mágneses Ni huzal a piros szorítópozához kerüljön
- Miután ráhúzzuk a kerámia védőcsövet a termo huzalokra, tovább húzzuk azokat, hogy már csak 20-30 mm lógjon ki, ezután a huzalokat az elülső részen megsodorjuk. Ennek az a célja, hogy később mindkét huzal megbízhatóan és egyenletesen belemerüljön a folyékony hegyanyagba. Ezután meghúzzuk a szorítócsavart.

- A hűlési idő méréséhez a termoelemeket a folyékony heganyagba mártjuk és ott is tartjuk, amíg az meg nem szilárdul. Mérés során a kijelzőn olvashatóak a hűlési idő értékek (800°C-ról 500°C-ra, valamint 800°C-ról 300°C-ra történő hűlés időtartamát)

- A mérés végeztével elvágjuk a huzalokat, majd a következő mérés elvégzéséhez meglazítjuk a szorítócsavart és előre toljuk a huzalokat.

### 3.3 Hegesztési paraméterek meghatározása

A hegesztési paramétereket a svéd SSAB Oxelösund acélgyártó cég megrendelésére készült WeldCalc elnevezésű szoftver segítségével határoztam meg, amely az EN 1011-2 szabványban lévő összefüggéseket alkalmazza. A szoftver a rendelkezésre álló adatok alapján pontos információkat szolgáltat a  $t_{8/5}$  hűlési időről. Elsőként a karbonegyenérték kiszámításához szükséges alapanyag összetételt kell megadni a programban.

| Input         |          | Calculations: Carbon equivalents |      |
|---------------|----------|----------------------------------|------|
|               | Weight % |                                  |      |
| C Carbon      | 0.16     | CE(IIW):                         | 0.54 |
| Si Silicon    | 0.23     | CET:                             | 0.36 |
| Mn Manganese  | 1.25     | CEN:                             | 0.52 |
| Cr Chromium   | 0.2      | Pcm:                             | 0.28 |
| Ni Nickel     | 0.04     |                                  |      |
| Mo Molybdenum | 0.605    |                                  |      |
| Cu Copper     | 0.01     |                                  |      |
| V Vanadium    | 0.04     |                                  |      |
| Ti Titanium   | 0.004    |                                  |      |
| Nb Niobium    | 0.016    |                                  |      |
| B Boron       | 0.001    |                                  |      |
| N Nitrogen    | 0.003    |                                  |      |

**Formulas**

$$CE(IIW) = C + Mn / 6 + (Cu + Ni) / 15 + (Cr + Mo + V) / 5$$

$$CET = C + (Mn + Mo) / 10 + (Cr + Cu) / 20 + Ni / 10$$

$$CEN = C + A(C) * (Si / 24 + Mn / 6 + Cu / 15 + Ni / 20 + (Cr + Mo + Nb + V) / 5 + 5 * B)$$

where  $A(C) = 0.75 + 0.25 * \tanh(20 * (C - 0.12))$

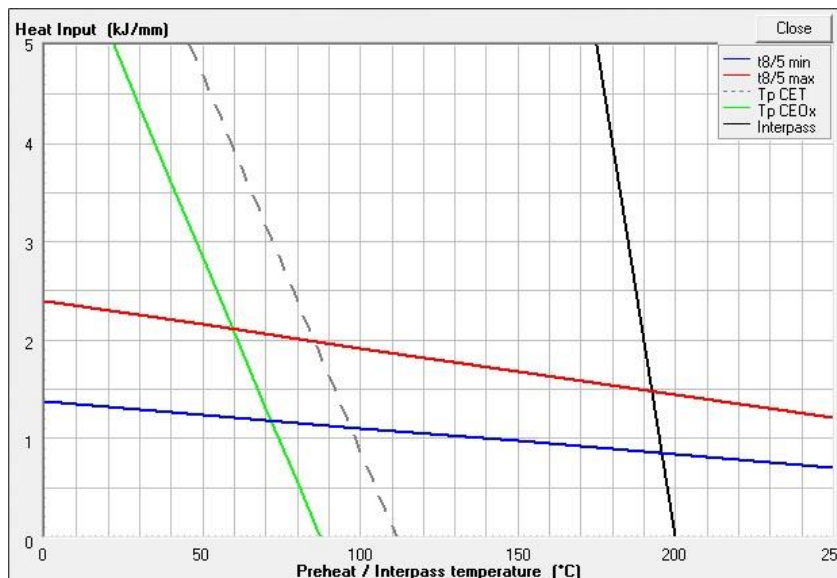
$$Pcm = C + Si / 30 + (Mn + Cu + Cr) / 20 + Ni / 60 + Mo / 15$$

5. ábra: Karbonegyenérték meghatározása

Következő lépésként a hegesztendő lemezek vastagságát kell megadni, továbbá a varratgeometriát kell kiválasztani. A kombinált lemezvastagságot a program számolja, ami ebben az esetben, 20 mm vastagságú lemezek PA pozícióban történő tompahegesztésekor, 40 mm lesz.

Ezután meghatározható a hegesztési munkaterület. (6. ábra) A vízszintes tengelyen az előmelegítési/rétegeközi hőmérséklet, a függőleges tengelyen pedig a vonalenergia szerepel. A fekete, piros, zöld és kék vonalak által határolt terület mutatja a hegesztési munkaterületet, amelyen belül a hegesztést el kell végezni. Ezt a szűk tartományt a hegesztési paraméterek pontos beállításával és a szigorú követelményeknek megfelelő hegesztéssel lehet betartani. Amennyiben a pirossal jelzett maximálisan megengedhető hűlési idő felé közelítünk, akkor a hőhatásövezet szívósságának és szilárdságának csökkenésével kell számolni. Ha választott

paramétereink a minimálisan előírt hűlési időt jelző kék vonal alá esnek, akkor átolvadási hiba veszélye áll fenn. A kívánt tartománytól jobbra eső terület csökkent mechanikai tulajdonságokat eredményez a hőhatásövezetben, a balra eső terület pedig hidegrepedési veszélyt eredményez.



**6. ábra:** Az S960QL jelű acél hegesztési munkaterülete a WeldCalc alapján

A hűlési időnek a gyártó által javasolt 5-15 s közé kell esnie WELDOX 960 E jelű acél esetében. Így a program segítségével, ügyelve arra, hogy a hűlési időintervallumon belül maradjanak a paraméterek, valamint, hogy a hegesztési munkaterületnek is megfeleljenek, 200 °C előmelegítési és 150 °C rétegeközi hőmérsékletet határoztam meg.

A program által megállapított előmelegítési hőmérsékletre és hűlési időre vonatkozó adatokat a 3.2.3; és 3.2.4 fejezeteknek megfelelően leellenőriztem a hegesztési próbák elkészítése előtt.

A CET szerinti minimális előmelegítési hőmérséklet a számítások alapján 153 °C lett, amelyet a tapasztalatok és a program ajánlása alapján 200 °C-ra választottam.

### 3.4 Hegesztési próbák elkészítése

A nagyszilárdságú szerkezeti acélok esetében kiemelt fontosságú a hegesztési paraméterek betartása. Csak így érhető el, hogy a hegesztett kötésekre vonatkozó minőségi követelményeket maradéktalanul teljesíteni lehessen.

Fontos, hogy a varratsorokat kis vonalenergiával készítse a hegesztő, a lehető legkevesebb megállással és újrakezdéssel. Kisebb keresztmetszetű, egymáshoz képest elcsúsztatott varratsorokat kell lerakni. Ezzel a módszerrel jobb ütőmunka értékek érhetők el mind a

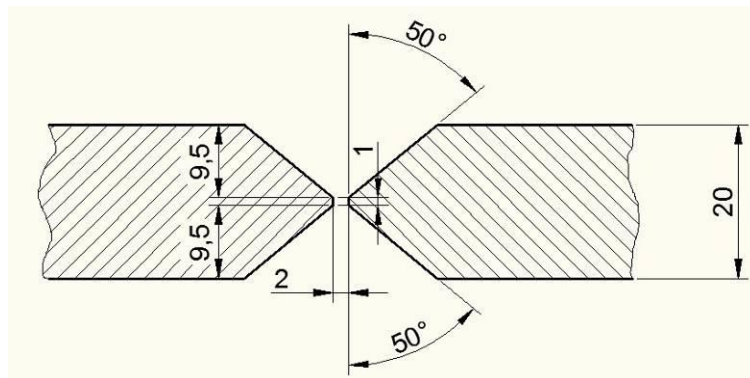
varratban, mind a hőhatásövezetben. Lengetett varratfelépítés szigorúan tilos, mert a képződő vastag varrathernyó rontja az előbb említett ütőmunka értékeket. A varratfelépítést oldalról kell kezdeni, így a következő varrathernyó hője kedvezően befolyásolja a hőhatásövezet tulajdonságait, a fedősornál különösen ügyelni kell erre. Az esetleges szegélykiolvadásokat, még lehetőleg a meleg varratból, köszörüléssel el kell távolítani. Szintén igaz ez a töltő sorok között, új sor kezdése előtt meg kell köszörülni a varratot. Szerelési segédvarratokat kisebb szilárdságú hozaganyaggal célszerű hegeszteni, azonban ebben az esetben is előmelegítés kell alkalmazni. A munkadarabon ívgyújtás a varrathornyon kívül nem megengedett, célszerű be-, és kifutó lemezek alkalmazása. A nem szándékos ívgyújtás nyomait ki kell köszörülni. A fentieket összefoglalva, a minőségi követelményeket kell előtérbe helyezni a teljesítménnyel szemben [15].

Ahhoz hogy a hegesztési paraméterek alakulását pontosan nyomon tudjam követni, kísérletem során rendelkezésemre állt a HKS által fejlesztett WeldQAS nevű folyamatfelügyelő rendszer. Ezt a rendszert ESAB LAH 500 típusú hegesztő berendezésre csatlakoztattuk. A műszer szenzorai egyidejűleg képesek mérni a hegesztési áramot, a feszültséget, valamint a gázáramot és a huzalelőtölést. Ez utóbbi kettőt sajnos nem tudtuk rögzíteni, ami azonban nem veszélyeztette a kísérletek sikerességét, mivel a számunkra két legfontosabb adatot (áramerősség, feszültség) tudtuk mérni. Maga a rendszer nagy segítséget nyújt a felügyeletben, a hibafelismerésben és a dokumentációban. Ipari alkalmazásokban előfordul, hogy a hegesztők ellenőrzésére is alkalmazzák, hogy betartják-e az előírt paramétereket, emellett az automatizált gyártás során készült varratokat bizonyos esetekben teljes mértékben dokumentálják a rendszer segítségével. A rendszer használatával különböző hibák is detektálhatók. Ilyenek az ívgyújtási hibák, pórusok, valamint a különböző kötési hibák; láthatóvá válnak a védőgáz- és huzalegyenetlenségek. Ezekből a hibaadatokból következtetéseket lehet levonni például az áramátadó kopására vagy a huzalelőtölési problémákra.

### **3.4.1 Hegesztett kötés kialakítása**

Kísérleteimhez a 7. ábrán látható, X kötéskialakítást használtam. A próbadarabokhoz az alapanyagot régebbi hegesztett kötések szétfűrészelésével nyertük, ügyelve arra, hogy a már meglévő kötéssel ellentétes oldalon hegesszünk. Mivel a szállított lemezek méretre szabása lángvágással történt, 5 mm-t lefűrészeltünk a szélükből, hogy ne befolyásolja a kész kötésünket a lángvágás hőhatása. A leélezés mechanikus megmunkálás útján történt, hosszgyalu segítségével. A minőségi követelményeknek megfelelően bekezdő és kifutó

lemezeket is elhelyeztünk az összeállítás során, hogy a bekezdés és kifutás se befolyásolja a kész kötés tulajdonságait.



*7. ábra: Hegesztett kötés kialakítása*

A 8. ábrán látható, hogy annak elkerülése érdekében, hogy semmilyen szennyeződés ne kerüljön a varratba a varratvályú környékét köszörüléssel tisztítottuk meg.



*8. ábra: Előkészített hegesztési próba*

Az így előkészített nagyszilárdságú lemezeket az előzetesen meghatározott 200 °C-ra melegítettük elő, gázégő segítségével. A hőmérséklet megfelelőségét hőkréta segítségével ellenőriztem.

### **3.4.2 Hegesztési próbák elkészítése**

Az előmelegített, hegesztésre váró szerelt próbák gyöksorát a hegesztő kézzel készítette el, ügyelve a hegesztési sebességre, valamint a már említett lengetett varratfelépítés mellőzésére. A töltősorok elkészítésére hegesztő kocsit (szekátort) alkalmaztam, amely előre beállított sebességgel készítette el a sorokat. A WeldQAS folyamatfelügyelő rendszer által rögzített értékek a 7. táblázatban foglaltam össze. Mivel a három hegesztett próba paraméterei között nagy eltérés nem volt, így a második és a harmadik próba adatainak közlésétől eltekintek.

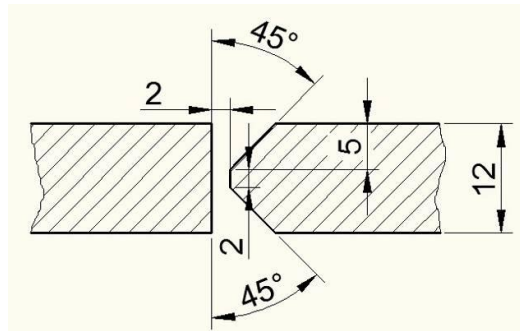
| Varratsor    | Előmelegítés [°C] | Sebesség [cm/min] | Áramerősség [A] | Feszültség [V] | Vonalenergia [J/mm] | Hűlési idő [s] |
|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|---------------------|----------------|
| 12. (takaró) | 150               | 45                | 305             | 30,4           | 990                 | 7,6            |
| 11. (takaró) | 150               | 45                | 298             | 30,7           | 977                 | 7,5            |
| 10. (takaró) | 150               | 45                | 298             | 30,4           | 969                 | 7,4            |
| 9. (takaró)  | 150               | 45                | 308             | 30,5           | 1003                | 7,7            |
| 8. (takaró)  | 150               | 45                | 304             | 30,5           | 992                 | 7,6            |
| 7. (takaró)  | 150               | 45                | 308             | 29,3           | 966                 | 7,4            |
| 6. (töltő)   | 150               | 45                | 303             | 29,5           | 958                 | 7,3            |
| 5. (töltő)   | 150               | 45                | 311             | 29,2           | 971                 | 7,4            |
| 4. (töltő)   | 150               | 45                | 308             | 29,4           | 968                 | 7,4            |
| 3. (töltő)   | 150               | 45                | 304             | 29,1           | 945                 | 7,2            |
| 2. (gyök)    | 180               | 27                | 194             | 22             | 764                 | 6,5            |
| Gyök         | 200               | 11                | 96              | 17,3           | 727                 | 6,7            |

**7. táblázat:** Első hegesztési próba paramétereit

A 7. táblázatban is látható, hogy az előmelegítés a gyöksor esetében a már említett 200 °C-ra történt. Mivel kétoldali varratról van szó, fordítás után a második gyöksor hegesztésekor, az átolvadási hiba elkerülése miatt, már nagyobb vonalenergiát, ebből adódóan pedig kisebb előmelegítési hőmérsékletet, 180 °C-t alkalmaztam. Rétegek közötti hőmérsékletnek 150 °C-t írtam elő, az előzetes számítások alapján. A hőmérséklet megfelelőségét folyamatosan ellenőriztem, hőkréta segítségével. A hegesztési sebesség stabilitásából látható, hogy a két gyöksor hegesztését hegesztő végezte, míg a töltő sorokat szekátor segítségével készítettem el. Az alkalmazott huzalelőtolás a két gyöksor esetén, 3 m/min és 4 m/min, a töltősorok esetén pedig 10 m/min értékű volt. A táblázat utolsó oszlopában látható hűlési idő értékek az előírt 5-15 s közötti tartományban vannak, tehát sikeresen tartottuk a  $t_{8/5}$  hűlési időre vonatkozó követelményeket. A FORTACO Zrt. ipari tapasztalatai alapján 6-10 °C [21] az előírt hűlési idő tartomány, amit szintén sikerült teljesíteni a kísérletek során. A varrat kétoldali kialakítása miatt ügyelni kellett a helyes varratfelépítésre, ezért a munkamenet közben fordítottuk a darabokat. Az esetleges kötési hibák elkerülése érdekében, minden sor után köszörülést végeztünk.

### 3.4.3 K kötés kialakítás

Az X kötés megválasztása előtt K kötés kialakítással (9. ábra) is próbálkoztunk 30° és 45° leélezéssel egyaránt, 12 mm vastag, szintén WELDOX 960 E minőségű lemezeken.



9. ábra: K kötés kialakítás

Ezzel a varratkialakítással nem sikerült megfelelő minőségű kötet létrehozni, a kötések darabolása közben, a gyöksornál anyagfolytonossági hiányt (átolvadási hibát) tapasztaltunk. A sikertelenséghez több hiba is hozzájárulhatott. A hibát okozhatta a berendezés, amivel az első kísérletek során hegesztettünk. Ez egy REHM MEGAPULS 500 W gyártmányú hegesztő berendezés volt, amely szinergikus függvények segítségével állítja be a hegesztési paramétereket (U, I). Ez azt jelenti, hogy a gép az előre definiált értékeket folyamatosan változtatta, nem tartotta be. Ez a hibaforrás többszöri beégést és megállást okozott a kísérletek alatt, mint utólag kiderült a berendezés kábele a kísérletek alatt hibás volt. A másik hibát okozó tényező a kötéskialakítás volt, az előmelegítés, és a rétegközi hőmérséklet gondos betartása ellenére is folyamatosan gyökhiba keletkezett; a túlságosan nagyra választott élszalag és a szűk illesztési rés okozták együttesen a hibát. Ezek mellett a hiba előfordulásának kockázatát növelte a hegesztő gyakorlatlansága is.



10. ábra: Átolvadási hiba a K kötésben

A hibás kötések, és az azokból készült csiszolatok – bemutató darabként – a későbbiekben oktatási célokra kerülnek felhasználásra.

## **4. MEGFELELŐSÉGET TANUSÍTÓ ANYAGVIZSGÁLATOK**

Egy hegesztési technológia megfelelőségéhez eljárásvizsgálatokat szükséges végezni. Ha a hegesztéstechnológia megfelelőnek bizonyul, az előzetesen elkészített utasítás (pWPS) gyártásba adható, hegesztési utasításként (WPS). Az S960QL acélminőség esetén az elfogadott WPS-t évente, gyártáspróbával kell felülvizsgálni és meghosszabbítani az érvényességét, amit az ipari környezetben szerzett tapasztalataim is bizonyítanak. A FORTACO Zrt. esetén ez így történik, termékeiknél évente felülvizsgálatokat végeznek azért, hogy a már használatban lévő WPS naprakésznek és érvényesnek tekinthető legyen.

A kész kötésen 100%-os terjedelemben végeztünk szemrevételezéses vizsgálatot, az MSZ EN ISO 17637:2011 szabvány alapján. A próbadarabokon a vizsgálat során az MSZ EN ISO 5817:2004 szabvány szerinti megengedettnél nagyobb eltérést nem tapasztaltam.

### **4.1. Roncsolásos anyavizsgálatok**

A próbatestek kimunkálását a tompavarratos kötésből az MSZ EN ISO 15614:2004 szabvány szerint végeztem el. A következő alfejezetekben ismertetem az alkalmazott anyagvizsgálati módszereket, a kapott eredményeket, valamint a hegesztett kötésen és az alapanyagon elvégzett vizsgálatok összehasonlítását.

#### **4.1.1 Makro csiszolat elkészítése**

A makro csiszolat elkészítéséhez a próbatestet forgácsolással készítettük elő, majd az előírások szerint különböző finomságú csiszolópapírok segítségével végeztük el a darab csiszolását. A csiszolást követően a vizsgálandó felület egy polírozási fázison ment keresztül, amelyet desztillált víz és alumínium oxid szuszpenziójával végeztünk el. Ezt követően marattuk a darabot, salétromsav alkoholos oldatával. A csiszolatról készült felvétel a *11. ábrán* látható. Az elkészült felvétel alapján, a csiszolaton jól azonosíthatók a varratsorok, valamint a hőhatásövezet. Nem megengedett eltérés nem tapasztalható.

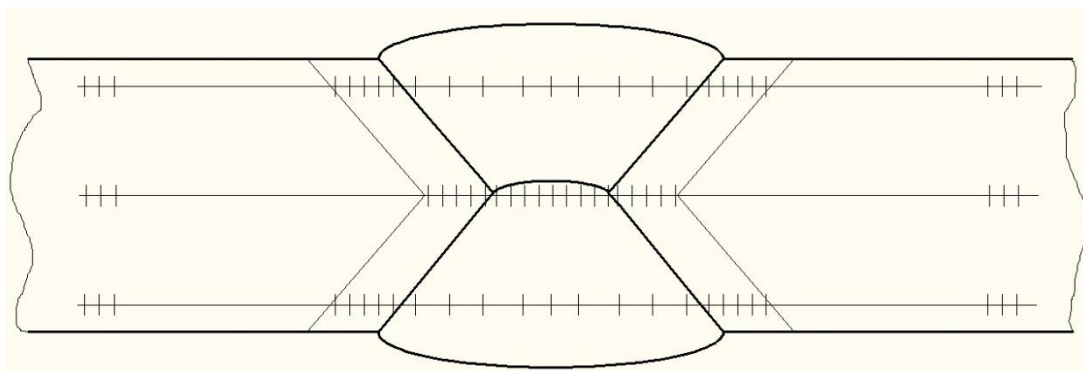


**11. ábra:** Makrocsiszolati kép (2% HNO<sub>3</sub>)

#### 4.1.2 Keménységvizsgálat

A makrofelvétel elkészítése után a próbadarabon keménységvizsgálatot végeztünk. A keménységvizsgálatot az MSZ EN 1043-1:1999 szabvány szerint hajtottuk végre, HV10 vizsgálati terhelés mellett. A vizsgálati lenyomatok átlójának leolvasásához mikrokeménységmérő eszközt használtam, mivel a rendelkezésre álló makrokeménységmérő berendezésen nem volt lehetőség a leolvasásra [9].

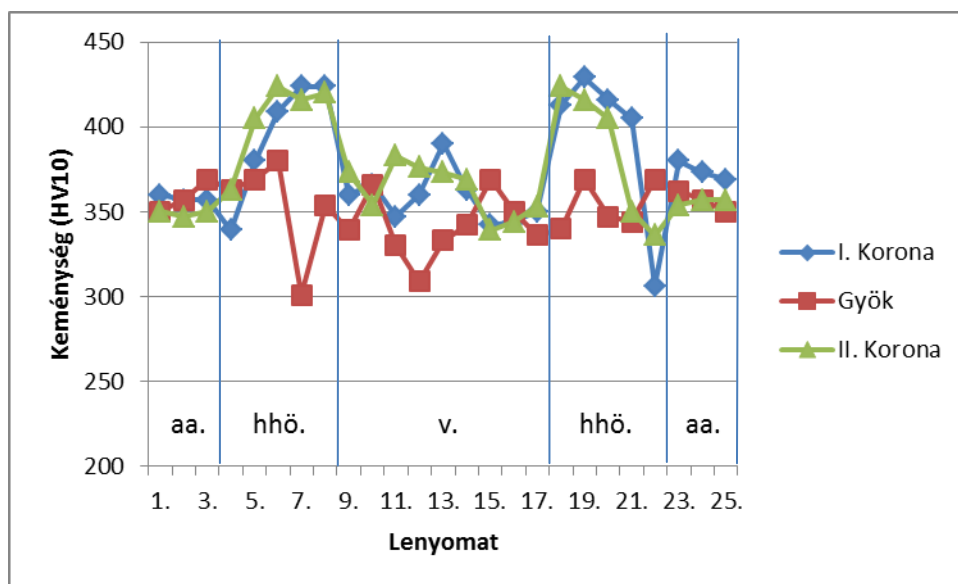
A vizsgálati darabon a lenyomatok számát és a szomszédos lenyomatok közötti távolságot úgy kell meghatározni, hogy azok egymásra ne legyenek hatással. Fontos szempont továbbá az, hogy megfelelő számú lenyomat készüljön a hegesztéskor keletkezett zónákban, tehát legyen elegendő vizsgálati lenyomat mind az alapanyagban, mind a hőhatásövezetben, mind a varratban, hogy egyaránt meghatározhatók legyenek a lágyult és keményedett részek. A 12. ábra bemutatja a keménységsorok és a lenyomatok elhelyezkedését.



**12. ábra:** HV10 keménységsorok

Fontos szempont volt a lenyomatok elkészítése közben, hogy lennie kell legalább egy lenyomatsnak a beolvadási vonaltól legfeljebb 0,5 mm-re, középpontjaik távolsága pedig nem lehet 1 mm-nél közelebb egymáshoz. Ez azért fontos, hogy az egymást követő lenyomatok ne legyenek egymással hatásra a vizsgálat folyamán. A korona oldalon a lenyomatok 2 mm-re helyezkedtek el az anyag szélétől.

Az 1. diagramon nyomon követhető a két koronaoldal valamint a gyök keménységeloszlása.



**1. diagram:** HV10 keménységeloszlás

A diagramon látható, hogy az MSZ EN ISO 15614-1 szabványban a CR ISO 15608 szerinti 3. anyagcsoport nem hőkezelt állapotára maximálisan megengedett 450 HV keménységet egyik mért érték sem haladta meg. Megfigyelhető, hogy mindkét koronaoldalon a keménységértékek javarészt 350 HV felett helyezkednek el. Észrevehető az is, hogy a hőhatásövezetben jelentősen megnőtt a keménység, keménységcsúcs alakult ki, amely az alkalmazott kis hőbevitelnek köszönhető. Az alkalmazott kis hőbevitel a számunkra kedvező keskeny durvaszemcsés övezet kialakulását segítette. A varratban, a szelvényvastagság közepén, csekély lágyulást tapasztalhatunk.

A gyökoldal esetén jelentős keménység különbségekről nem beszélhetünk. Egyik övezetben sem közelítik meg a mért értékeket az előírt maximumot. Nagymértékű keményedés és lágyulás két, lokális értéktől eltekintve nem tapasztalható. A mért keménységértékek 300 és 400 HV között mozognak. Jelentős keményedés a gyöksort követő hegesztési sorok megeresztő hatása miatt nem alakult ki, mivel a gyöksort követő varratsorok megeresztették egymást, valamint a már meglévő gyöksort.

## 4.2 Szakítóvizsgálat

Az elkészült hegesztett kötésekből szakítóvizsgálatra szánt próbatesteket munkáltunk ki. A cél az volt, hogy meghatározzuk a hegesztett kötés szakítószilárdságát, valamint egyezményes folyáshatárát. A vizsgálat végrehajtásához hengeres próbatesteket alkalmaztunk, Ø10 mm vizsgálati keresztmetszettel. Ennek egyik oka az volt, hogy a vizsgáló berendezés maximális terhelhetőségét ne lépjük túlát a vizsgálat során, a másik pedig az, hogy az egyezményes folyáshatár ( $R_{p0,2}$ ) meghatározásához szükséges finomnyúlásmérőt könnyen tudjuk rögzíteni a próbatesten. A próbatestek befogó része menetesre lett kimunkálva a biztos rögzítés és az esetleges megcsúszás elkerülése érdekében.

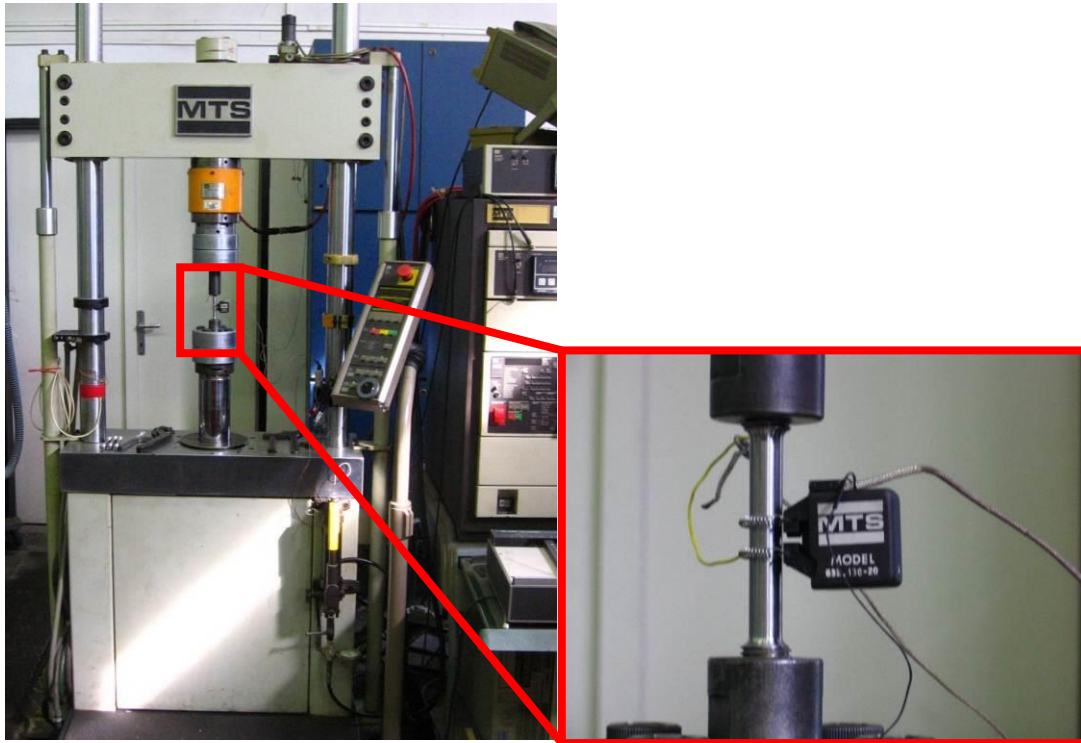
A szakítóvizsgálatot az MSZ EN 895:1999 szabvány szerint hajtottuk végre. A próbatest méreteit, a tompahegesztett kötések szakítószilárdságának és szakadási helyének meghatározására szolgáló keresztirányú szakítóvizsgálat általános irányelveit az MSZ EN 10002:2001 szabvány tartalmazza. A próbatestek kimunkálása során ügyeltünk arra, hogy a forgácsolást követően a varrat tengelye a vizsgálati szakasz közepére kerüljön, így – mivel kétoldali varratról van szó – a gyök oldal, amely a varrat közepén helyezkedik el, a próbatest középvonalára esett.

Az MSZ EN ISO 15614:2004 szabvány előírása szerint, a hegesztett kötésből kimunkált próbatest szakítószilárdsága nem lehet kevesebb, mint az alapanyagra vonatkozó szabványban előírt érték. Ez az S960QL minőség esetén az MSZ EN 10025-6:2004 szerint 980 MPa.

A szakítóvizsgálatokat MTS gyártmányú, elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezésen végeztük el. Az egyezményes folyáshatár ( $R_{p0,2}$ ) meghatározására 50 mm méréstartományú finomnyúlásmérőt alkalmaztunk. A vizsgáló berendezést úgy állítottuk be, hogy a finomnyúlásmérő 0,2 mm hosszváltozás esetén kikapcsolja a terhelő erőt, így az eszköz levehető, szakadáskor nem sérül. Ezután szakadásig terheltük a próbatesteket.

A mérés folyamán az anyagvizsgáló berendezés folyamatosan rögzítette a terhelő erőt, az eltelt időt és a befogópofák egymástól való távolodásának mértékét.

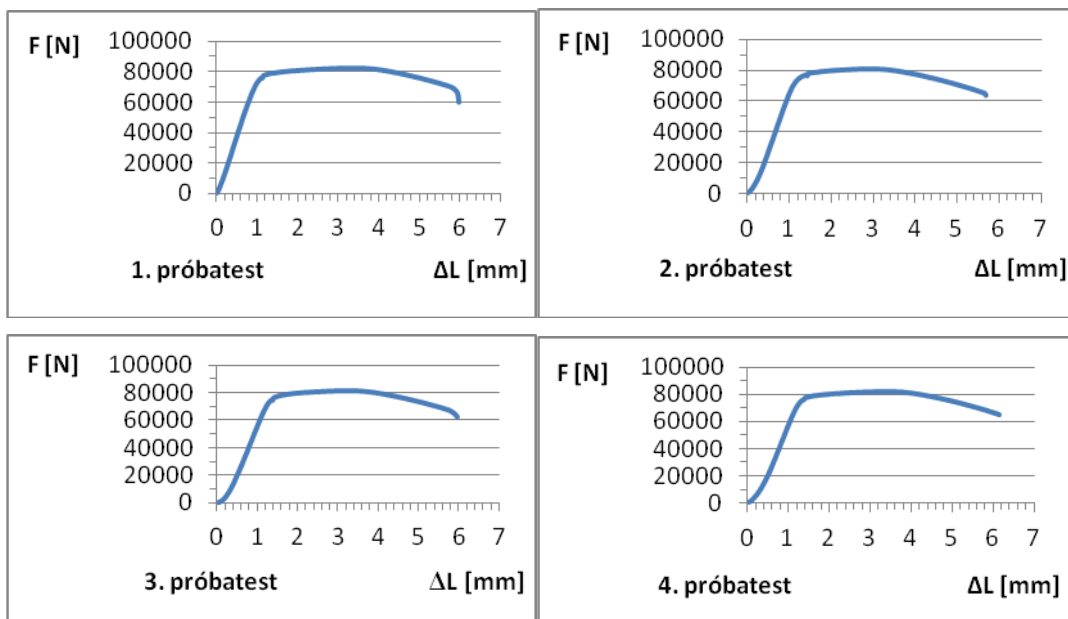
A 13. ábrán látható a vizsgálati elrendezés, valamint a felnagyított képen a finomnyúlásmérő elhelyezkedése a vizsgált próbatesten.



*13. ábra: Vizsgálati elrendezés*

#### 4.2.1 Eredmények összehasonlítása

A szakítóvizsgálat után a rögzített adatokat kiértékeltem. A 2. diagramon a vizsgált próbatestek szakítódiagramjai láthatók.



*2. diagram: S960QL alapanyagból készült hegesztett kötések szakítódiagramjai (Ø10 mm)*

Megfigyelhető a diagramok alapján, hogy a négy próbatest hasonló jellegzetességeket mutatott a szakítóvizsgálat folyamán, azok mindegyike a hőhatásövezetben szakadt. A kiértékelés során megállapítottam a szakítószilárdságot ( $R_m$ ) és a százalékos szakadási nyúlást ( $A$ ), keresztmetszet csökkenést ( $Z$ ), valamint a finomnyúlás mérő által rögzített értékek segítségével az egyezményes folyáshatárt ( $R_{p0,2}$ ). Az említett értékek meghatározására használt képleteket a 8. táblázat tartalmazza:

|                                    |            |                                       |     |
|------------------------------------|------------|---------------------------------------|-----|
| <b>Szakítószilárdság</b>           | $R_m$      | $R_m = \frac{F_m}{S_0}$               | MPa |
| <b>Százalékos szakadási nyúlás</b> | $A$        | $A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$ | %   |
| <b>Egyezményes folyáshatár</b>     | $R_{p0,2}$ | $R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$     | MPa |
| <b>Keresztmetszet csökkenés</b>    | $Z$        | $Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0}$           | %   |

**8. táblázat:** Mechanikai jellemzők meghatározása

A 8. táblázat képletei alapján és a vizsgálat közben, valamint vizsgálat után rögzített adatok segítségével, a négy próbatesten kapott értékek átlagait összehasonlítottam az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet által korábban, az alapanyagon végzett vizsgálat eredményeivel. Az összehasonlított értékek a 9. táblázatban láthatók.

| <b>Vizsgálati minta</b>       | <b><math>R_{p0,2}</math><br/>[MPa]</b> | <b><math>R_m</math><br/>[MPa]</b> | <b>A<br/>[%]</b> | <b>Z<br/>[%]</b> |
|-------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|
| S960QL alapanyag              | 996                                    | 1037                              | 16,8             | 68,9             |
| S960QL hegesztett kötés (135) | 1020                                   | 1041                              | 11,3             | 42,8             |

**9. táblázat:** S960QL alapanyag és hegesztett kötés szakítóvizsgálatának összehasonlítása

A 9. táblázatból látható, hogy a hegesztett kötés teljesítette az MSZ EN 10025-6:2004 szabvány által előírt minimális szakítószilárdság értéket (980 MPa), ráadásul, ahogyan azt a hegesztéstechnológia tervezésekor reméltük, biztonsággal meg is haladta azt. Folyáshatár tekintetében szintén jobbnak bizonyultak a hegesztett kötésből kimunkált próbatestek értékei, mint az alapanyagon mértek. A százalékos szakadási nyúlás és a keresztmetszet csökkenés (kontrakció) tekintetében nem mondható el ugyanez, de mivel a hegesztett kötés inhomogén, valamint ridegebb, mint az alapanyag, ezért a kisebb értékek érthetők és magyarázhatók.

### 4.3 Nagyciklusú fárasztóvizsgálat

A gépek, berendezések, illetve szerkezetek és szerkezeti elemek többségét több évtizedes üzemeltetésre tervezik. Ismétlődő igénybevétel esetén a terhelések száma a teljes élettartam alatt akár több tízmillió is lehet. Abban az esetben beszélünk nagyciklusú fáradásról, amikor a terhelő erő viszonylag kicsi, a tönkremeneteli ciklusszám viszont nagy,  $10^4$  és  $10^8$  ( $10^9$ ) ciklus közé esik. A szerkezetek elemeit és a berendezések alkatrészeit érő ismétlődő igénybevételek többfélék lehetnek, az egyszerű húzó, húzó-nyomó, hajlító, csavaró igénybevételtől az összetett terhelésekig.

A nagyciklusú fárasztás esetén a próbatest makroszkopikusan csak rugalmas alakváltozást szenved, a vizsgálat során keresztmetszete állandónak tekinthető, a számított feszültség pedig valódi feszültség. Mivel a feszültség és az alakváltozás között rugalmas állapotban általában lineáris kapcsolat van, a vizsgálati eredmények azonosnak tekinthetők, függetlenül attól, hogy a mérések állandó feszültség vagy alakváltozás amplitúdóra vezérelve folytak. Ettől függetlenül a nagyciklusú fárasztás esetén a károsodást okozó helyi képlékeny alakváltozás mértékét, így a mérési eredményeket, nagyon sok tényező befolyásolhatja. Mindezekre tekintettel, ugyanazon feltételek fennállása esetén is több próbatesten kell elvégezni a vizsgálatot, az eredmények jelentős szórása miatt [10].

#### 4.3.1 Nagyciklusú fárasztóvizsgálatra alkalmazott próbatest

A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokat mind kimunkált próbatesteken, mind alkatrészeken, esetenként akár komplett szerkezeteken, illetve berendezéseken szokás végezni.

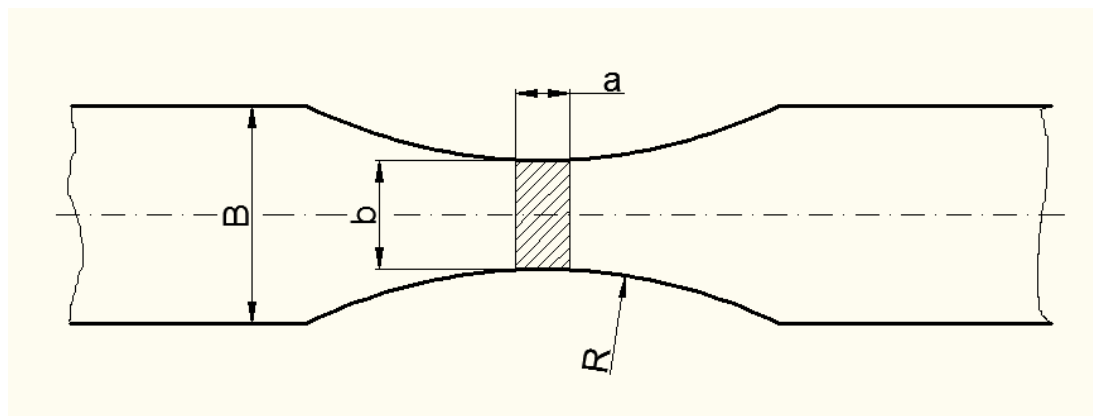
A próbatest elkészítésénél nagyon gondosan kell eljárni. Biztosítani kell az alapanyag azonos előéletét, azonosnak kell lennie a hengerlési, valamint a kovácsolási paramétereknek, egyezniük kell a próbatest kimunkálási műveleteinek és paramétereinek. Rendszerint elvárás a nagyciklusú fárasztásra szánt próbatesteknél a felület polírozása. A próbatestek gyártása során mindenképpen kerülni kell a maradó feszültségek kialakulását, mert ezek módosíthatják a fárasztási eredményeket.

A fárasztó próbatestek alakjának és méretének kialakításakor figyelembe kell venni:

- a félkész termék méretét és alakját (amelyből kimunkálásra kerülnek a próbatestek);
- a vizsgálat célját és az igénybevétel jellegét;
- a fárasztó berendezés befogó szerkezetét (a befogott végek méretének és alakjának kialakítására);

- a vizsgálati szakasz és a befogó rész közötti megfelelő átmenet biztosítását (feszültségtorlódás csökkentése).

Mivel az előző tulajdonságoknak egyetlen általánosan használható próbatest típus sem tesz eleget, ezért több különböző alakú és méretű próbatestet különböztetünk meg [10]. A leggyakrabban használt, és általunk is alkalmazott, a lapos próbatest. A 14. ábrán látható az általunk használt típus kialakítása, a 10. táblázatban pedig a szakirodalom által ajánlott méretek és méretarányok [10].



14. ábra: Lapos próbatest nagyciklusú fárasztóvizsgálathoz

| Próbatest típusa      | Vastagság a [mm] | Szélesség b [mm]    | Befogó szélesség B [mm] | Lekerekítési sugár R [mm] |
|-----------------------|------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| Rádiusszal gyengített | 3 – 20           | $(0,5 - 2) \cdot a$ | $\geq 2 \cdot b$        | $\geq 5 \cdot b$          |

10 táblázat: Lapos próbatest ajánlott méretei nagyciklusú fárasztó vizsgálathoz

#### 4.3.2 Vizsgáló berendezés

A fárasztó berendezéseket az előállított igénybevétel fajtája szerint a következőképpen lehet csoportosítani: húzó, húzó-nyomó, hajlító, forgó-hajlító, csavaró és összetett igénybevételeket megvalósító fárasztógépek. A terhelés előállítási módja szerint a fárasztó berendezések lehetnek mechanikusak, elektro-mechanikusak, hidraulikusak, elektromágnesesek és pneumatikusak; működési elv alapján pedig két nagy csoportra oszthatók: a terhelés-változást erőhatás útján előállítók, illetve rezonancia elven működők [10][27].

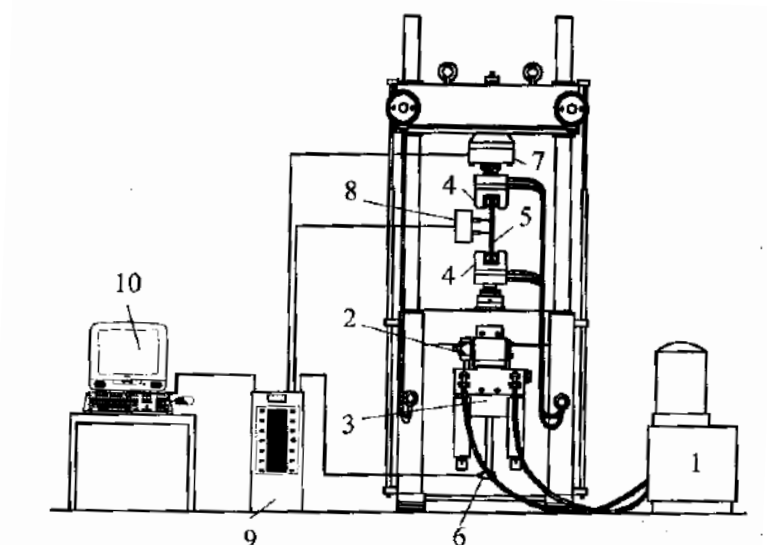
A vizsgálatokat az Anyagszerkezzettani és Anyagtechnológiai Intézetben rendelkezésre álló elektro-hidraulikus elven működő univerzális anyagvizsgáló berendezésen végeztük el. A

berendezés teljesen számítógép vezérelt, a vizsgálat folyamán rögzíti a mért adatokat, valamint azok alapján szabályozza azt.

Vizsgálat során a próbatestre ható terhelő erőt a hidraulikus szivattyú által előállított nagynyomású olaj hozza létre. Az olaj vezérlőszelepeken át jut egy munkahengerbe, amely vezérlőszelepek szabályozzák, hogy az olaj a munkahenger alsó vagy felső hengerfelébe kerüljön, ezzel biztosítva a hengerrúdhoz kapcsolódó befogó felfelé, illetve lefelé való mozgását (nyomó vagy húzó terhelés). A dugattyú elmozdulását, az erő nagyságának és a próbatest valamely méretének változását érzékelők – útdó, erőmérő cella, nyúlásmérő – villamos jellé alakítják és egy szabályozó-átalakító egységbe továbbítják. Az előzőleg számítógép segítségével generált terhelési függvény értékeit a szabályozó egység összehasonlítja az érzékelő által rögzített értékekkel. Amennyiben a két érték különbsége egy bizonyos értéket meghalad, a szabályozó egység módosítja a szabályozó szelepek állását, így biztosítva az előre beállított terhelési függvény értékeit. A vizsgálat során az érzékelő egységről érkezett jeleket az átalakító egység digitalizálja, továbbítja a számítógéphez, amely tárolja azokat.

Ezen korszerű berendezések nagy előnye, hogy fárasztóvizsgálatok során a szabályozott változó nem csak a terhelő erő lehet, hanem a próbatest valamely méretének változása is. Meg kell jegyezni azt is, hogy az említett berendezéssel, befogószerkezet segítségével hárompontos hajlító vizsgálat is végrehajtható. Ezt a vizsgálóberendezés által nyújtott lehetőséget alkalmaztuk a **4.4 fejezetben** ismertetésre kerülő fáradásos repedésterjedéses vizsgálat során.

A berendezés elvi felépítése a *15. ábrán* látható [10].



**15. ábra:** Elektro-hidraulikus, univerzális anyagvizsgáló berendezés  
 (1) hidraulikus szivattyú; (2) vezérlőszelepek; (3) munkahenger; (4) befogók; (5) próbatest;  
 (6) útdő; (7) erőmérő cella; (8) nyúlásmérő; (9) szabályozó és átalakító egység; (10)  
 számítógép [10]

#### 4.3.3 Vizsgálati eredmények értékelése

A vizsgálatok eredményeit a [33] szakirodalom alapján értékeltük ki.

A fárasztóvizsgálat eredményeit különböző tényezők befolyásolhatják, amelyek a következők lehetnek:

- a próbatest, alkatrész mérete, felületi érdessége, felületi rétegének tulajdonságai;
- a terhelés jellemzői (igénybevétel fajtája, terhelés frekvenciája, túlterhelés);
- környezet hatásai (hőmérséklet, korróziós közeg, bevonat) [10].

A fárasztóvizsgálat után a berendezés által rögzített értékeket diagramon ábrázoltuk. A mért értékek alapján bejelölt pontok az egyes próbatestek fáradási értékét mutatják, vagyis azt, hogy milyen feszültségtartományban, hány ciklusnyi terhelés után törtek. Ahogy az korábban említésre került, igen nagy szórással rendelkeznek a mért értékek. Az alapanyagból kimunkált próbatesteken mért értékeket a 11. táblázat, a hegesztett kötésből kimunkált próbatesteken mért értékeket a 12. táblázat rögzíti.

| <b>Próbatest<br/>jele</b> | <b>a<br/>[mm]</b> | <b>b<br/>[mm]</b> | <b>F<sub>max</sub><br/>[N]</b> | <b>F<sub>min</sub><br/>[N]</b> | <b>ΔF<br/>[N]</b> | <b>Δσ<br/>[MPa]</b> | <b>N<br/>[ciklus]</b> |
|---------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>902</b>                | 5,75              | 7,75              | 28300                          | 2830                           | 25470             | 572                 | 426726                |
| <b>903</b>                | 5,80              | 7,75              | 30000                          | 3000                           | 27000             | 601                 | 313183                |
| <b>907</b>                | 5,96              | 7,89              | 27500                          | 2750                           | 24750             | 526                 | 411854                |
| <b>910</b>                | 5,92              | 7,86              | 32300                          | 3230                           | 29070             | 625                 | 185125                |
| <b>911</b>                | 5,97              | 7,86              | 33600                          | 3360                           | 30240             | 644                 | 110111                |
| <b>912</b>                | 5,96              | 8,08              | 28700                          | 2870                           | 25830             | 536                 | 785860                |
| <b>918</b>                | 5,97              | 5,39              | 17900                          | 1790                           | 16110             | 501                 | 5000000               |
| <b>919</b>                | 5,97              | 5,31              | 18500                          | 1850                           | 16650             | 525                 | 5000000               |

***11. táblázat:** Nagyciklusú fárasztóvizsgálat alapanyagból kimunkált próbatesteken mért értékei*

| <b>Próbatest<br/>jele</b> | <b>a<br/>[mm]</b> | <b>b<br/>[mm]</b> | <b>F<sub>max</sub><br/>[N]</b> | <b>F<sub>min</sub><br/>[N]</b> | <b>ΔF<br/>[N]</b> | <b>Δσ<br/>[MPa]</b> | <b>N<br/>[ciklus]</b> |
|---------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>H01</b>                | 5,90              | 7,45              | 24000                          | 2400                           | 21600             | 491                 | 450384                |
| <b>H02</b>                | 5,90              | 7,65              | 22000                          | 2200                           | 19800             | 439                 | 1078390               |
| <b>H03</b>                | 6,05              | 7,40              | 26000                          | 2600                           | 23400             | 523                 | 1044764               |
| <b>H04</b>                | 5,85              | 7,70              | 20000                          | 2000                           | 18000             | 400                 | 715343                |
| <b>H05</b>                | 5,90              | 8,10              | 24000                          | 2400                           | 21600             | 452                 | 6359992               |
| <b>H06</b>                | 6,00              | 7,70              | 20000                          | 2000                           | 18000             | 390                 | 5000000               |
| <b>H07</b>                | 5,95              | 7,70              | 26750                          | 2675                           | 24075             | 525                 | 351689                |
| <b>H08</b>                | 5,95              | 7,75              | 28200                          | 2820                           | 25380             | 550                 | 339886                |
| <b>H09</b>                | 5,95              | 7,70              | 25000                          | 2500                           | 22500             | 491                 | 3203555               |
| <b>H10</b>                | 5,95              | 7,75              | 28200                          | 2820                           | 25380             | 550                 | 535311                |
| <b>H11</b>                | 5,95              | 7,85              | 22000                          | 2200                           | 19800             | 424                 | 5000000               |
| <b>H12</b>                | 6,00              | 7,65              | 20750                          | 2075                           | 18675             | 407                 | 961722                |
| <b>H13</b>                | 6,00              | 7,70              | 20750                          | 2075                           | 18675             | 404                 | 5000000               |
| <b>H14</b>                | 6,00              | 7,75              | 25400                          | 2540                           | 22860             | 492                 | 1892740               |

**12. táblázat:** Nagyciklusú fárasztóvizsgálat hegesztett kötésből kimunkált próbatesteken mért értékei

Az alapanyag és a hegesztett kötés próbatesteiről készült képek a 16. és 17. ábrán láthatók.

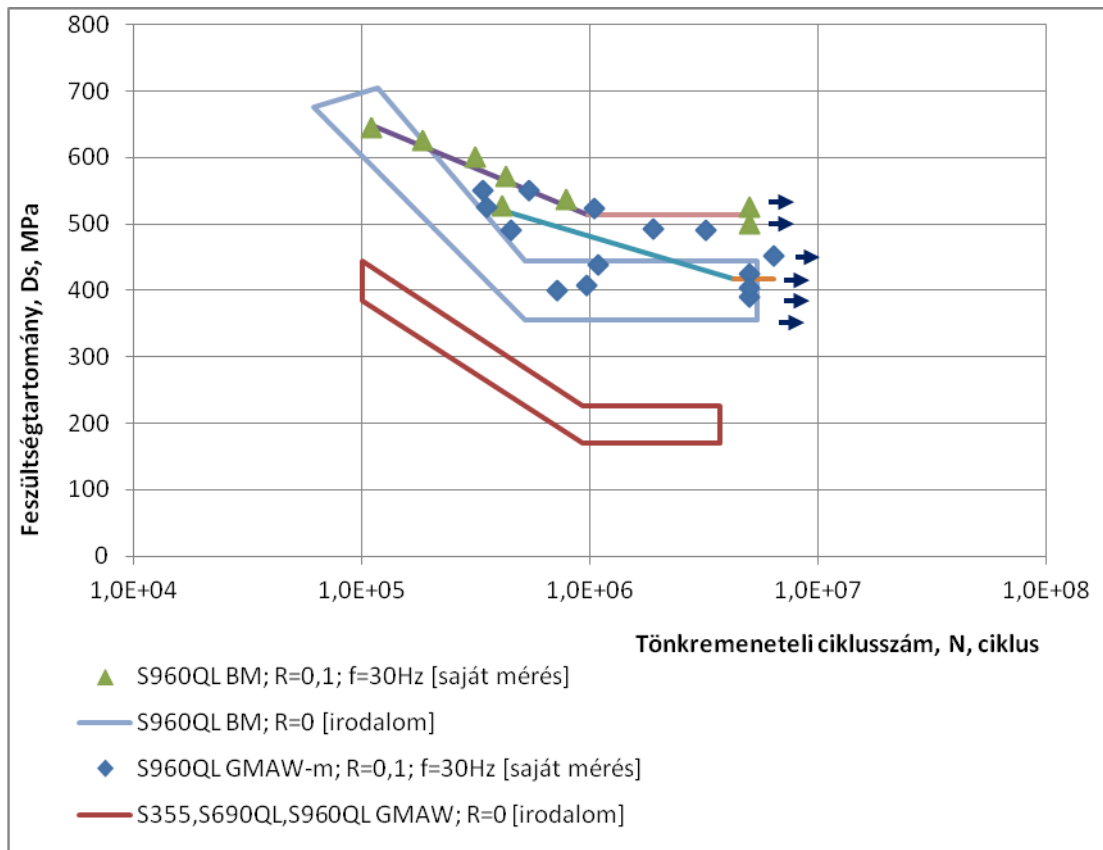


**16. ábra:** Nagyciklusú fárasztó vizsgálat próbatestei, vizsgálat után (alapanyag)



**17. ábra:** Nagyciklusú fárasztó vizsgálat próbatestei, vizsgálat után (hegesztett kötés)

Az eredményeket a 18. ábra szemlélteti. A diagramban bejelölt tartományok a szakirodalom által megállapított értékeket mutatják. Megfigyelhető, hogy mind az alapanyagból, mind a a hegesztett kötésekben kimunkált próbatetek mérése során előfordultak olyan próbatestek, amelyek nem törtek el, még bírták volna tovább a ciklikus terhelést (nyíllal jelölt értékek).



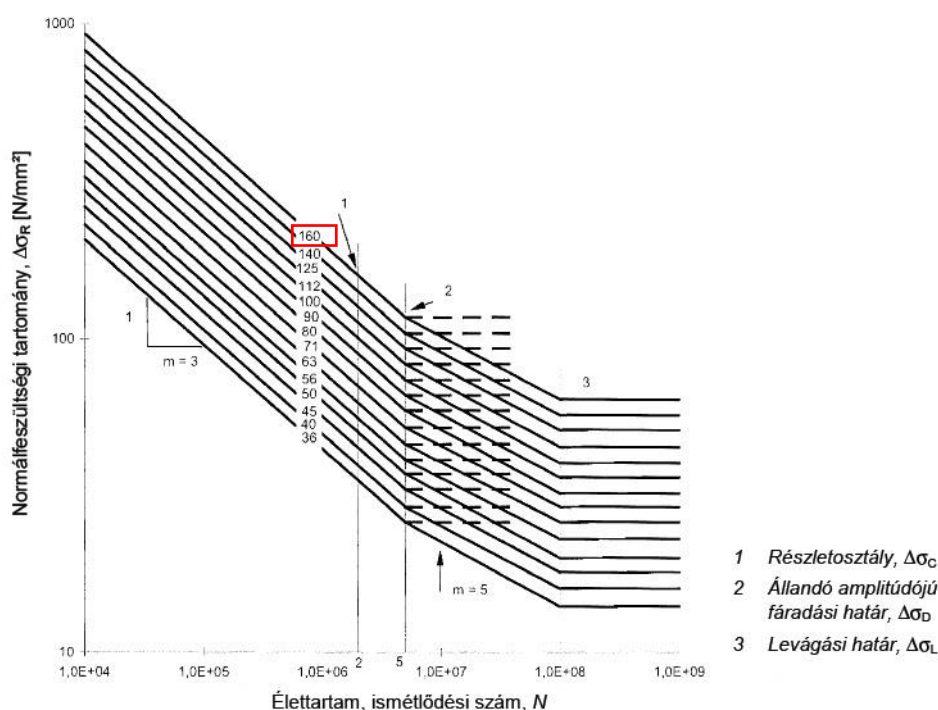
**18. ábra:** Nagyciklusú fárasztó vizsgálat eredményei

Észrevehető az is, hogy a szakirodalom által, az S960QL minőségre közölt értékeket jellemzően meghaladja az általunk vizsgált hegesztett kötés és alapanyag törési feszültsége. Mind a hegesztett kötés, mind az alapanyag nagyobb feszültségtartományban több ciklust volt képes elviselni a szakirodalom által közölt értéknél. Saját méréseinket összehasonlítva látható a szakirodalom által szintén megállapított tendencia, miszerint az alapanyag önmagában jobb fáradási tulajdonságokkal bír, mint a hegesztett kötés.

A felhasználható értékekből, a diagramon való ábrázolás után előállítottuk a fáradási határt jelző egyeneseket. Ennek módszere a következő: a folyamatosan eső lineáris szakaszt (élettartam szakasz), lineáris regresszió módszerével; a konstans szakaszt (kifáradási határ szakasz) átlagolás segítségével állítottuk elő. A két szakasz metszése segítségével alakult ki a határgörbe.

A szakirodalom által megállapított tartomány és a saját vizsgálati eredmények különbözősége részben magyarázható azzal, hogy a vizsgálatokat nem kimunkált próbatesteken, hanem hegesztett kötésekben végezték el [28].

Itt kell megjegyezni, hogy a korábban említett EUROCODE 3 szabványban, a fáradásra történő méretezésre vonatkozó görbékkel összehasonlítva az általunk végzett mérés görbéjét, jelentős különbség fedezhető fel. Ahogy azt már említettem, a EUROCODE 3 nem tesz különbséget a nagyszilárdságú szerkezeti és a hagyományos szerkezeti acélok között a méretezés során. A fáradásra megengedhető legnagyobb feszültségérték 160 MPa, ami a 240 MPa garantált folyáshatárú szerkezeti acélnak felel meg. Ebből az okból kifolyólag, valamint a szabvány által közölt és az általunk végzett kísérlet során felvett görbéket összehasonlítva megállapítható, hogy a EUROCODE 3 szabvány módosításával akár jobban ki lehetne használni a nagyszilárdságú szerkezeti acélok adta lehetőségeket. Az EN 1993-1-9:2005 szerinti, szerkezeti acélokra vonatkozó fáradási görbék a 19. ábrán láthatók.



19. ábra: EN 1993-1-9:2005 szerinti megengedett feszültséghatárok [32]

Az ábrából látható, hogy a legmagasabb feszültségérték görbéje nem közelíti meg az általunk mért tényleges nagyszilárdságú acélokra vonatkozó értéket.

#### 4.4 Fáradásos repedésterjedés

Az ismétlődő igénybevételű szerkezetek, különösen a hegesztett szerkezetek esetén a fáradásos törés bekövetkezésének gyakorisága jóval meghaladja a statikus törését, ezért ezen szerkezetek méretezése más koncepciót kíván. A megengedett feszültségekkel való számolás, hiába foglal magában valamilyen törési valószínűséget, nem alkalmas a szerkezetben lévő, gyártási eredetű vagy üzemeltetés során keletkező eltérések, hibák figyelembevételére.

A fáradásra való méretezésnek alapvetően két koncepciója van. Az egyik koncepció, a biztos élettartamra való méretezés, azt feltételezi, hogy a szerkezeti elem hibamentes, vagy ha tartalmaz is hibát, akkor abból az adott igénybevételi szinten nem keletkezik terjedő repedés. Tehát, a méretezés során figyelembe vett körülmények között nem következik be katasztrofális törés, a szerkezeti elemet sem kell cserélni az élettartam lejárta előtt. A másik koncepció, a sérülésbiztos méretezés, alapja, hogy egyes szerkezetekben vannak repedések és ezek a repedések folyamatosan növekednek. E szerint az elv szerint a szerkezetnek, a hiba sorsáról való döntésig, illetve az azzal összhangban lévő beavatkozásig viselnie kell a rá ható terhelést.

A két koncepció közül a másodikat alkalmazzák szélesebb körben, amelynek okai a következők:

- a biztos élettartamra való méretezés sokszor elégtelennek bizonyul, amit több káreset is igazol;
- a tervezett élettartam elérésekor végrehajtott szerkezeti elem csere esetén jelentős fel nem használt élettartam elveszhet, ami ellentmond az alkatrészek mind teljesebb kihasználására vonatkozó törekvéseknek;
- gépészeti szerkezetek folytonossági hiányoktól mentes gyártása csak elvben garantálható;
- egyre erősödő a gazdasági igény arra, hogy az észlelt hiba azonnali javítása helyett a hiba veszélyességének megítélése történjen (a hiba veszélytelensége esetén véghezvitt javítás gazdaságtalan) [10].

#### **4.4.1 Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatához alkalmazott próbatestek**

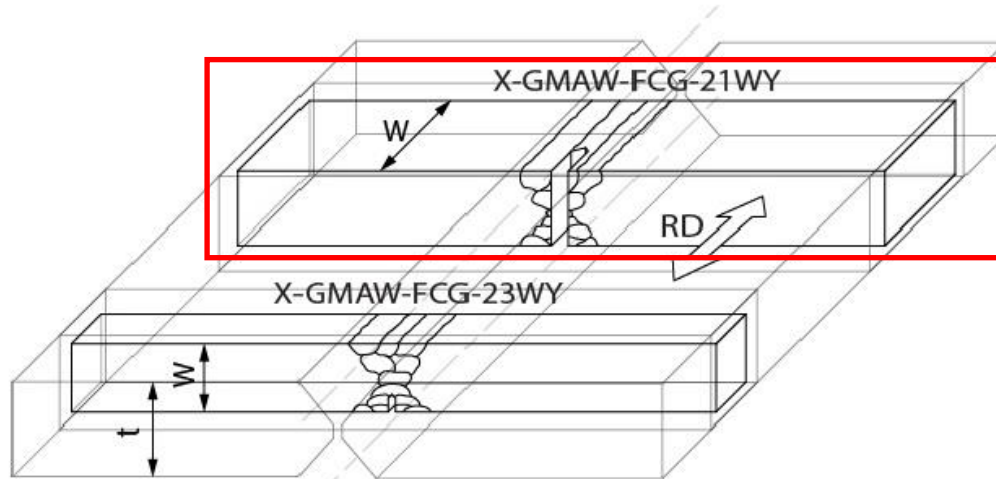
A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok során mérni kell a terjedő repedés méretét, számlálni kell az igénybevételi ciklusok számát, majd meg kell állapítani a fáradásos repedésterjedési sebességet. Ennek segítségével, valamint a feszültségintenzitási tényező tartományával ( $\Delta K$ ) együtt meghatározható a fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramjának gyakorlatilag fontos része.

A leggyakrabban alkalmazott próbatest típusok a következők:

- három ponton terhelt hajlító próbatest (TPB),
- kompakt szakító próbatest (CT),
- kör alakú, kompakt szakító próbatest (DCT),
- ék alakú bemetszésű próbatest (WOL),

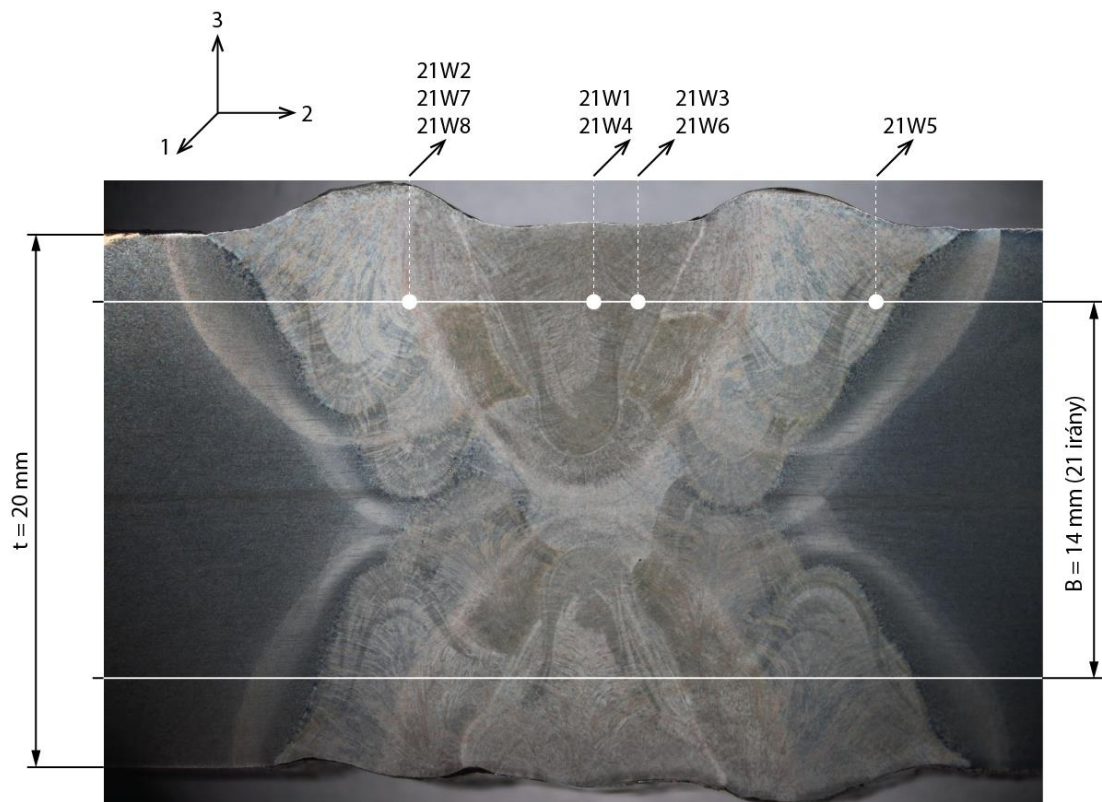
- középen bemetszett szakító próbatest (MT) [10].

Az ismertett próbatest típusok közül célszerű a CT és a TPB próbatestek alkalmazását előtérbe helyezni, ezért a kísérleteink végrehajtásához TPB próbatesteket alkalmaztunk. A próbatest elhelyezkedését a hegesztett próbadarabban, a 20. ábrán, látható X-GMAW-FCG-21WY jelzésű próbatest rajza szemlélteti.



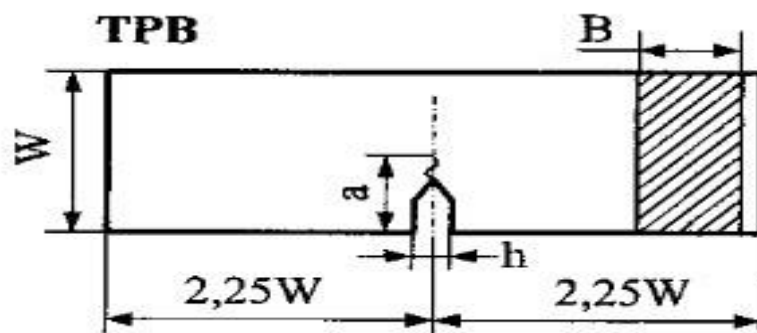
**20. ábra:** TPB próbatest elhelyezkedése a hegesztési próbában [29]

A 21. ábrán a próbatestek bemetszéseinek helye látható. A bemetszések különböző elhelyezkedésével a kötésben lehetséges repedések helyeit modelleztük, illetve a kötést repedésterjedés szempontjából statisztikusan közelítettük meg.



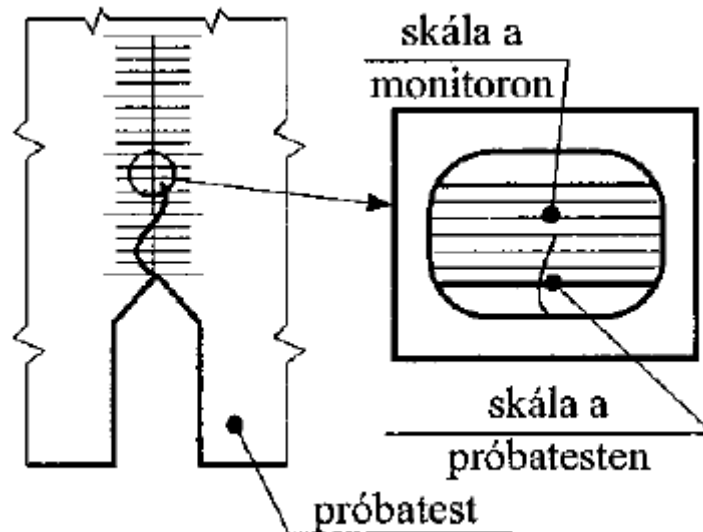
**21. ábra:** Próbatetek bemetszéseinek elhelyezkedése a hegesztett kötésben

A próbatest szabványos méretei a 22. ábrán láthatóak.



**22. ábra:** TPB próbatest szabványos méretei [9]

A fáradásos repedésterjedés követésének több lehetősége közül az optikai módszert választottuk. A módszer elvét a 23. ábra szemlélteti.



23. ábra: Optikai módszer elve [9]

Az optikai módszerrel a repedésméret változást a próbatest felületére felvitt és/vagy az érzékelő eszközön rendelkezésre álló skála/skálák segítségével követhetjük nyomon. Ez a nyomon követés történhet szabad szemmel, vagy nagyítás segítségével a próbatest egyik, vagy akár mindkét oldalán.

Az optikai módszer előnyei:

- egyszerűen kivitelezhető;
- a próbatest anyagának nem kell idealizált kritériumoknak megfelelnie (például legyen lineárisan rugalmas);
- a próbatest anyagának nem kell a vizsgálat elve miatti fizikai feltételeknek (például ferromágnesesség) megfelelnie.

Az optikai módszer hátrányai:

- szubjektív elemeket hordoz (például leolvasási hiba);
- a próbatest felületét a repedés csúcs láthatóság érdekében megfelelően elő kell készíteni;
- a felgyorsult folyamatok nehezen vagy alig követhetők;
- automatikus adatrögzítés nem megoldható, pontosabban nem szokás annak alkalmazása.

A próbatesten a forgácsolt bemetszést a lehető legrövidebbre célszerű venni, mivel ekkor kaphatunk a legszélesebb intervallumban eredményt. A próbatestek felületének

előkészítésénél figyelembe kell venni a terjedő repedés követésére választott módszert. A felületes előkészítés ellehetetlenítheti a mérést, míg a túlzott előkészítés gazdaságtalannak bizonyulhat [9][10].

#### 4.4.2 A vizsgálati eredmények meghatározása

A fáradásos repedésterjedési sebesség meghatározásához, az összetartozó repedésméret-igénybevételi ciklusszám, azaz  $a-N$ , adatok ismerete szükséges.

Több ismert módszer közül mi azon módszert alkalmaztuk, mikor egy mérésből származó meghatározott számú adatpárral dolgozva állapítjuk meg a fáradásos repedésterjedés jellemző mérőszámait.

A próbatest geometriájából adódó  $\Delta K$  feszültségintenzitási tényező tartományt, valamint a meghatározott terhelő erő határait a 13. táblázat tartalmazza. A próbatest jellegéből adódóan hárompontos hajlítással végeztük el a vizsgálatokat.

| Próbatest jele   | $F_{\max}$<br>[N] | $F_{\min}$<br>[N] | $\Delta F$<br>[N] | $\Delta K$<br>[MPam <sup>1/2</sup> ] |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 9-GMAWm-FCG-21W1 | 14000             | 1400              | 12600             | 22,99                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W2 | 15600             | 1560              | 14040             | 25,03                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W3 | 15500             | 1550              | 13950             | 25,11                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W4 | 15500             | 1550              | 13950             | 25,25                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W5 | 17000             | 1700              | 15300             | 27,72                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W6 | 16200             | 1620              | 14580             | 27,73                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W7 | 16600             | 1660              | 14940             | 27,71                                |
| 9-GMAWm-FCG-21W8 | 16600             | 1660              | 14940             | 27,27                                |

**13. táblázat:** TPB próbatestekre ható terhelés, valamint feszültségintenzitási tényező

A vizsgálatok során  $R = 0,1$  terhelés aszimmetria tényezőt alkalmaztunk.

A feszültségintenzitási tényező tartományának meghatározásához a (7) összefüggést használtuk:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}} Y\left(\frac{a}{W}\right) [MPam^{\frac{1}{2}}], \quad (7)$$

ahol:

$\Delta F$  – terhelő erő tartománya [N],

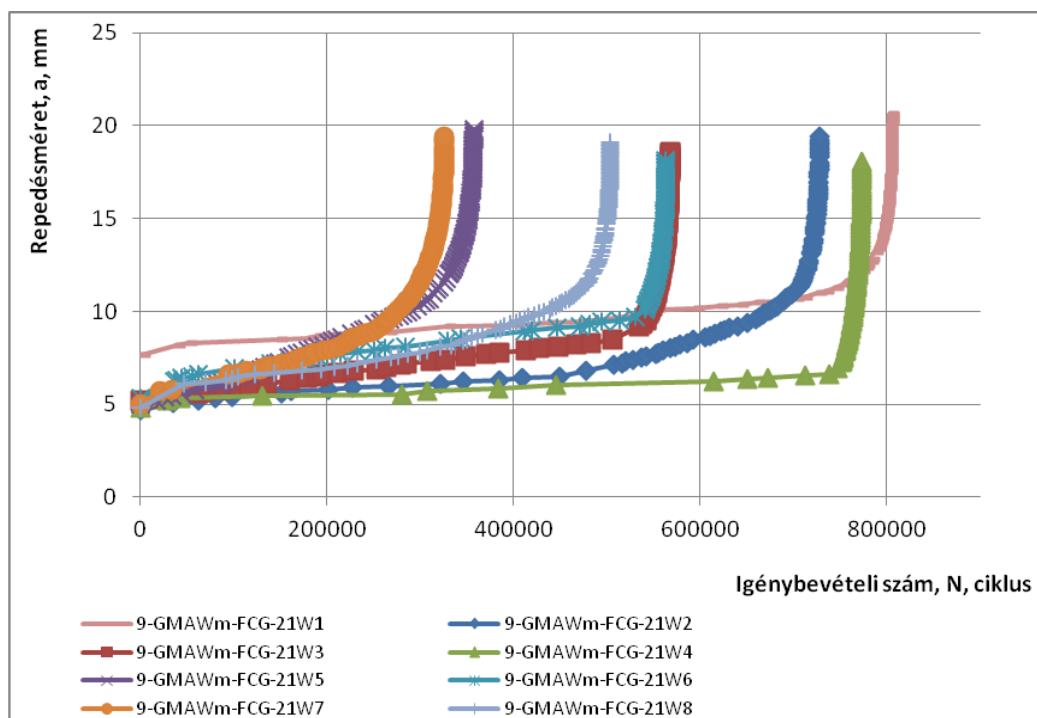
$L$  – a vizsgálat során alkalmazott támaszköz [mm],

$B$  – a próbatest szélessége [mm],

$W$  – a próbatest vastagsága (jellemző méret) [mm],

$Y\left(\frac{a}{W}\right)$  – a próbatestre jellemző geometriai függvény.

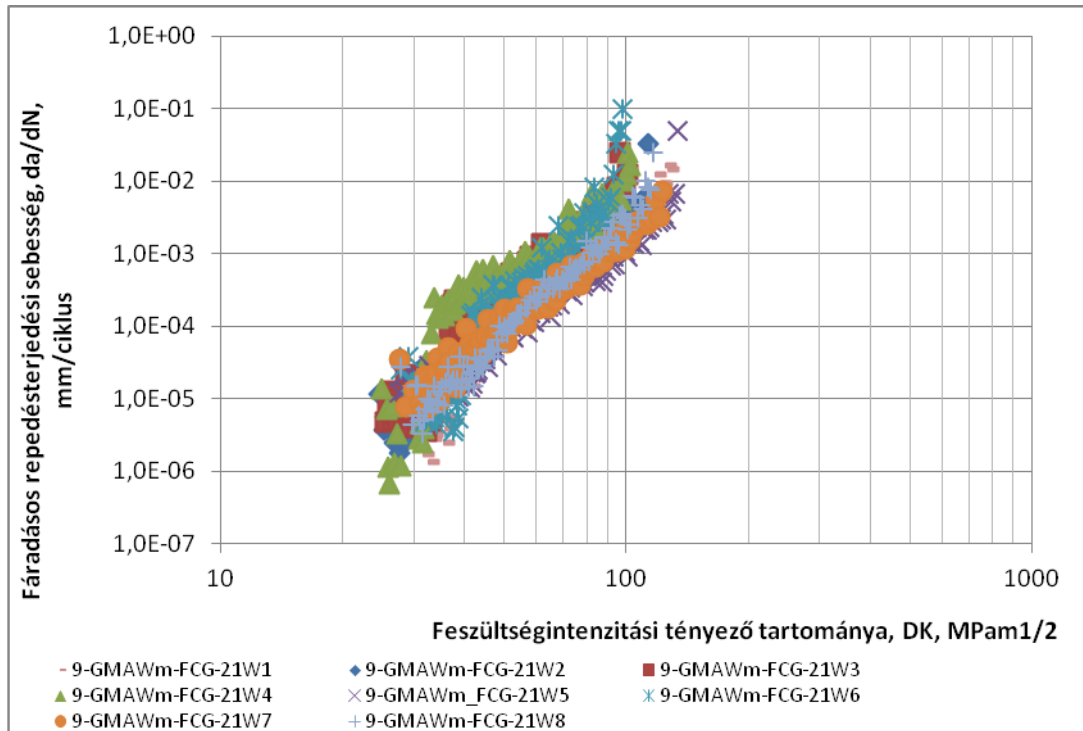
A vizsgálat után, a vizsgáló berendezés által mért adatokból, a 24. ábrán látható diagramokat kaptuk, illetve ábrázoltuk.



**24. ábra:** Fáradásos repedésterjedés  $a$ - $N$  diagramja

A diagramon látható szakaszok a különböző próbatestek repedésméretének növekedését szemléltetik, az igénybevételi ciklusszám növekedésével összhangban, egészen törésig.

A 24. ábrán látható diagramból lineáris regresszió segítségével előállítottuk a 25. ábrán látható kinetikai diagramot, amely, a  $da/dN$  azaz a fáradásos repedésterjedési sebesség és a  $\Delta K$ , azaz feszültségintenzitási tényező tartományát szemlélteti.



**25. ábra:** Fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramjai

A görbék állandóinak meghatározásához szükséges, fáradásos repedésterjedést leíró Paris-Erdogan összefüggés (8) a következő:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (8)$$

ahol:

$\frac{da}{dN}$  – fáradásos repedésterjedési sebesség,

$\Delta K$  – feszültségintenzitási tényező tartománya [ $MPam^{\frac{1}{2}}$ ]

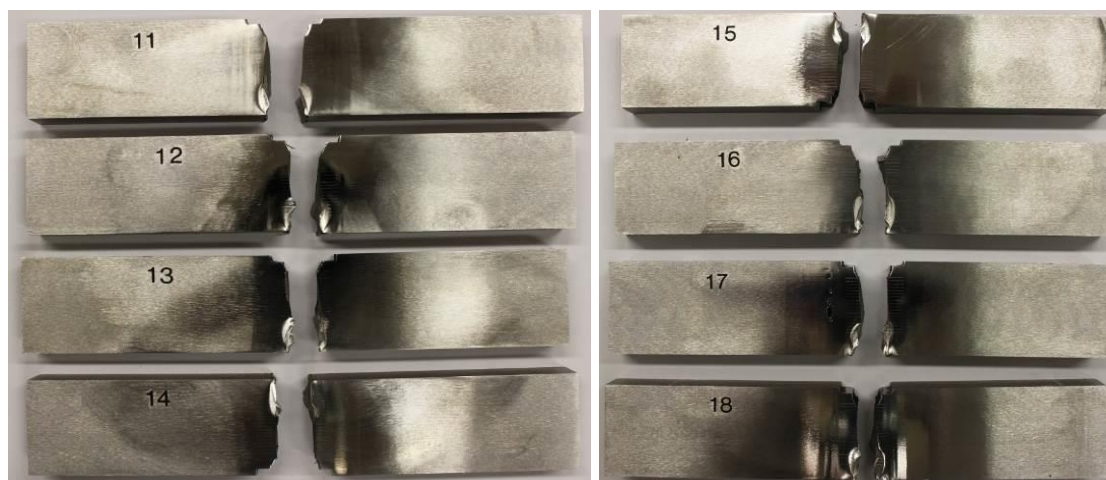
C, n – állandók [10].

A vizsgálati eredményeket a 14. táblázat tartalmazza.

| Próbatest jele   | C                      | n     | R      |
|------------------|------------------------|-------|--------|
| 9-GMAWm-FCG-21W1 | $1,052 \cdot 10^{-12}$ | 4,760 | 0,9743 |
| 9-GMAWm-FCG-21W2 | $1,035 \cdot 10^{-12}$ | 4,766 | 0,9798 |
| 9-GMAWm-FCG-21W3 | $8,694 \cdot 10^{-11}$ | 3,848 | 0,9530 |
| 9-GMAWm-FCG-21W4 | $7,066 \cdot 10^{-10}$ | 3,466 | 0,9665 |
| 9-GMAWm-FCG-21W5 | $1,999 \cdot 10^{-12}$ | 4,420 | 0,9834 |
| 9-GMAWm-FCG-21W6 | $1,864 \cdot 10^{-12}$ | 4,772 | 0,9548 |
| 9-GMAWm-FCG-21W7 | $6,791 \cdot 10^{-12}$ | 4,200 | 0,9832 |
| 9-GMAWm-FCG-21W8 | $6,678 \cdot 10^{-14}$ | 5,330 | 0,9897 |

**14. táblázat:** TPB próbatestek vizsgálati eredményei

A próbatestekről, a vizsgálatok után készült képek a 26. ábrán láthatók.



**26. ábra:** TPB próbatestek, vizsgálat után

Ahhoz, hogy az alapanyag fáradásos repedésterjedésre vonatkozó tulajdonságát össze tudjam hasonlítani a hegesztett kötés tulajdonságával, a Paris-Erdogan összefüggés n kitevőjét vettem alapul. Az általunk vizsgált, hegesztett kötésből készült próbatestek vizsgálati eredményeinek statisztikai adatait összehasonlítottam az alapanyagból készült próbatestek vizsgálati eredményeinek statisztikai adataival [31]. Az eredmények összehasonlítása a 15. táblázatban látható.

| <b>Mérőszám</b>           | <b>S960QL alapanyag</b> | <b>S960QL hegesztett kötés</b> |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| <b>Átlag</b>              | 3,847                   | 4,445                          |
| <b>Szórás</b>             | 0,667                   | 0,594                          |
| <b>Szórási együttható</b> | 0,1734                  | 0,134                          |

**15. táblázat:** S960QL alapanyag és hegesztett kötés eredményeinek statisztikai adatainak összehasonlítása

A 15. táblázat statisztikai adatainak összehasonlítása után látható az alapanyag és a hegesztett kötés eltérő fáradásos repedésterjedési viselkedése. Az  $n$  kitevők átlaga a hegesztett kötés esetében nagyobb értékű, mint az alapanyagé. A szórás, valamint a szórási együttható értékei pedig arra utalnak, hogy a hegesztett kötés vizsgálati eredményei között nem voltak olyan szintű eltérések, mint az alapanyag esetén. Ez azt mutatja, hogy az alapanyag fáradásos repedésterjedéssel szembeni érzékenysége fokozott, illetve a hegesztett kötés lokális inhomogenitásai nem voltak jelentősek.

A kapott eredményeket később fel lehet használni különböző számítások elvégzésére [31]:

- tönkremenetelt okozó repedésméret meghatározása;
- maradó élettartam függvény meghatározása;
- terjedőképes repedésmérethez tartozó maradó élettartam becslése;
- károsodási paraméterek és függvények számítása.

## KÖVETKEZTETÉSEK

Dolgozatom első felében ismertettem a nagyszilárdságú acélok különböző csoportjait, majd rátértem a nemesített nagyszilárdságú acélok tulajdonságaira, különös figyelmet fordítva a gyártástechnológiára, amely segítségével előállítható az említett acéltípus. Ezután a nemesített nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének problémáival foglalkoztam, amelyek leginkább az előállításkor alkalmazott gyártástechnológiára vezethetők vissza. Bemutattam az egyik legalapvetőbb hibalehetőséget, a hidegrepedési veszélyt, amely nagyszilárdságú acélok hegesztése során problémát jelenthet. Az ennek kiküszöbölésére szolgáló javaslatokat figyelembe véve, a következő fejezetben a hegesztéstechnológiát terveztem meg.

Több alkalmas technológia közül a FORTACO Zrt.-nél látott ipari alkalmazásra, valamint szakirodalmi javaslatokra való tekintettel, az MSZ EN ISO 4036 szerinti 135 kódjelű, aktív védőgázos fogyóelektródás ívhegesztést alkalmaztam. Az eljáráshoz pWPS-t készítettem, a megfelelő paraméterek kiválasztásához pedig ismertettem az alapanyag, a hozaganyag, valamint a védőgáz tulajdonságait. Bemutattam a különböző paraméterek kiszámításának módjait, valamint az előmelegítési hőmérséklet és a  $t_{8/5}$  hűlési idő fontosságát.

A technológia gondos megtervezése után a próbadarabok hegesztése során használt eszközök bemutatására került sor. A hegesztési kísérletek során a paraméterek folyamatos alakulását nyomon tudtam követni a WeldQAS elnevezésű folyamatfelügyelő rendszerrel, amely a már említett pWPS pontosítása során igen nagy segítséget nyújtott.

A kész próbadarabokból ezek után próbatesteket munkáltunk ki, különböző vizsgálatok elvégzéséhez.

Makrocsiszolat készítése után, HV10 terheléssel, keménységvizsgálatot végeztünk, mind a korona oldalakon, mind a gyök oldalon. A keménységsorok adataiból jól látható a különböző irodalmi források által említett keménységcsúcsok kialakulása, amelyek mellett a varratban csekély kilágyulást is tapasztaltunk, és ez mindhárom keménység sor esetén megfigyelhető volt (koronaoldalak és gyökoldal).

Az elkészült hegesztett kötésből szakítóvizsgálati próbatesteket készítettünk, a vizsgálatokat pedig finomnyúlásmérő segítségével végeztük el. Ezzel sikerült a próbatest nyúlási adatait rögzíteni, majd a rögzített adatokból meghatároztam a hegesztett kötés egyezményes folyáshatárát. A hegesztett kötés szakítóvizsgálatának eredményeit összehasonlítottam az alapanyag szakítóvizsgálatának eredményeivel. Megfigyeltem, hogy sem a szakítószilárdság, sem a folyáshatár értékei nem romlottak az alapanyaghoz képest,

ezzel szemben a szakadási nyúlás és a keresztmetszet csökkenés százalékos értékei csökkentek.

Dolgozatom következő fejezetében a nagyciklusú fárasztóvizsgálatokat ismertettem. Ez a vizsgálat azért szükséges, hogy meg tudjuk állapítani a különböző szerkezetek, szerkezeti elemek ismétlődő terhelésekre vonatkozó reakcióját a teljes élettartamuk során. A vizsgálati körülmények, a felhasznált próbatestek, valamint a vizsgálóberendezés bemutatása után közöltem a vizsgálati eredményeket. Egy diagram segítségével összehasonlítottam az általunk mért alapanyag és hegesztett kötés fáradási görbéit a szakirodalom által közölt értékekkel. Megállapítottam, hogy a szakirodalom értékeihez képest az általunk mért értékek szignifikánsan magasabbak voltak, amely az eltérő próbatest kialakításra is visszavezethető. Az általunk mért alapanyag és hegesztett kötés értékeinél megfigyelhető, hogy az alapanyag magasabb feszültségtartományt bírt ki, ezzel szemben a hegesztett kötés alacsonyabb feszültségtartományt több cikluson át viselt el. Megállapítottam azt is, hogy a EUROCODE 3 szerinti feszültséghatár alulmarad az általunk mért értékekhez képest, tehát ha a EUROCODE 3 szerint végezzük a méretezést, akkor nem tudjuk teljes mértékben kihasználni a vizsgált nagyszilárdságú szerkezeti acél nyújtotta előnyöket.

Az utolsó fejezetben a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálat módszerét és magukat a hegesztett kötésekben kimunkált próbatesteken elvégzett vizsgálatokat ismertettem. Kiemelem a próbatestek elkészítésénél, pontosabban a bemetszések elhelyezésénél alkalmazott statisztikai megközelítést. A hegesztett kötés vizsgálatának eredményeit szakirodalom által közölt eredményekkel hasonlítottam össze, összehasonlítási alapként a repedésterjedést leíró Paris-Erdogan összefüggés kitevőjét választottam. Az alapanyag esetében kisebb értékeket tapasztaltam, mint az általunk készített hegesztett kötésekben készült próbatesteknél, ami összhangban van a vonatkozó általános tendenciával.

Összességében megállapítható, hogy az általunk készített hegesztett kötés az elvártak megfelelően teljesített, a kidolgozott hegesztéstechnológia alkalmas megfelelő minőségű, ismétlődő igénybevételeknek is ellenálló hegesztett kötések készítésére.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Zhang, C.; van der Vyver, S.; Hu, X.; Lu, P.: Fatigue crack growth behavior in weld-repaired high-strength low-alloy steel, Engineering Fracture Mechanics, 2011.
- [2] Gáspár, M.; Balogh, A.: Hegesztéstechnológiai paraméterablak nagyszilárdságú acélok hegesztésénél, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., p.: 11-16., 2012.
- [3] Balogh, A.; Gáspár, M.: Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója, Hegesztéstechnika, XXXIII. évf. 3. sz., p: 23-28., 2012.
- [4] Szunyogh, L.: Hegesztés és rokon technológiák Kézikönyv, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007.
- [5] Balogh, A.; Török, I.; Gáspár, M.; Juhász, D.: Present state and future of advanced high strength steels, Journal of Production Process and Systems, 2012.
- [6] Lukács, J.: Technológiai vizsgálatok című tantárgy előadási anyaga, 2012.
- [7] Pogonyi, I.: Roncsolásos anyagvizsgálatok 3. Technológiai vizsgálatok, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet.
- [8] Gáspár, M.; Balogh, A.: GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steels, Production Process and Systems vol. 6. No. 1. pp. 9-24, 2013.
- [9] Tisza, M.: Anyagvizsgálat, Miskolci Egyetemi Tankönyvkiadó, 2008.
- [10] Lukács, J.; Nagy, Gy.; Harmati, I.; Koritárné, F. R.; Kuzsella, Lné, K. Zs.: Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből, Miskolci Egyetemi Tankönyvkiadó, 2012.
- [11] Johansson, B.; Collin, P.: Eurocode for high strength steel and applications in construction, Lulea University of Technology, Sweden, 2005.
- [12] Komócsin, M.: Nagyszilárdságú acélok és hegeszthetőségük, Hegesztéstechnika, XIII. évf. 1. sz, p.: 5-9, 2002.
- [13] Gáti, J.: Hegesztési Zsebkönyv, Cokom Kft, Miskolc, 2008.
- [14] Balogh, A.; Schäffer, J.; Tisza, M.: Mechanikai Technológiák, Miskolc, 2007.
- [15] Gáspár, M.: Nagyszilárdságú, nemesített állapotú szerkezeti acélok hegesztése, Miskolc, 2010.
- [16] Blomquist, A.; Collin, P.; Ranby, A.: On design of butt welds in QT-Steel, Publication 156, Swedish Institute of Steel Construction, Stockholm, 1996.
- [17] Tisza, M.: Metallográfia, Miskolci Egyetemi kiadó, 2008.
- [18] Kovács, M.: Áttekintés a hidrogén okozta repedésveszély elkerülésére alkalmazott módszerekről, Hegesztéstechnika XIV. évf. 4. sz., p. 24-27.
- [19] Rautaruukki corporation: Welding general, Helsinki, 2013.
- [20] Gáspár, M.: A nemesített állapotú nagyszilárdságú acélok hagyományostól eltérő hegesztési megoldásai középvastag lemezeknél, Miskolc, 2013.
- [21] Sas, I.: Hegesztési Nyári Egyetem előadásanyag, Miskolc, 2013.
- [22] Hobbacher, A.: The new IIW recommendations for fatigue assessments of welded joints and components, 2007.
- [23] Lagerquist, O.; Clarin, M.; Gozzi, J.; Völling, B.; Part, D.; Stötzl, J.; Lieurade, H-P.; Depale, B.; Huther, I.; Herison, S.; Bergers, J.; Martsch, R-M.; Carlsson, M.; Samuelsson, A.; Sonander, C.: Efficient lifting equipment with extra high-strength steel – Final report, European Commission Technical Steel Research, 2007.
- [24] Pijpers, R. M.; Kolstein, M. H.; Romeijn, A.; Bijlaard, F. S. K.: Fatigue experiments on very high strength steel base material and transverse butt welds, Advanced Steel Construction Vol. 5, 2007.

- [25] Érsek, L.: A hegesztett nagyszilárdságú acélok fáradási szilárdságának növelése utólagos kezelési eljárások alkalmazásával, Hegesztéstechnika, XVII. évf. 3. sz., p.: 13-17., 2006.
- [26] Haagensen, P. J.; Maddox, S. J.; IIW recommendations on post weld improvement of steel and aluminium structures, 2009.
- [27] Zsáry, Á.: Méretezés kifáradásra a gépészetben, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- [28] Hamme, U.; Hauser, J.; Kern, A.; Schriever, U.: Einsatz hochfester Baustähle im Mobilkranbau, Stahlbau 69, 2000.
- [29] Lukács, J.; Gáspár, M.: Fatigue crack propagation limit curves for high strength steels and their application for engineering critical assessment calculations, Miskolci Egyetem, 2012.
- [30] Sampath, K.: An understanding of HSLA-65 plate steels, ASM International, 2005.
- [31] Lukács, J.: Módszer fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék meghatározására és annak alkalmazása nagyszilárdságú acélokhoz, Bányászati és Kohászati Lapok, 145. évf. 2012/3 sz., p.: 43-48, 2012.
- [32] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, CEN, May 2005
- [33] Nakazawa, H.; Kodoma, S.: Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves. Statistical research on fatigue and fracture. Current Japanese materials research – Vol. 2. Eds.: Tanaka, T.; Nishijima, S.; Ichikawa, M., Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan, pp. 59-69, 1987.

## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

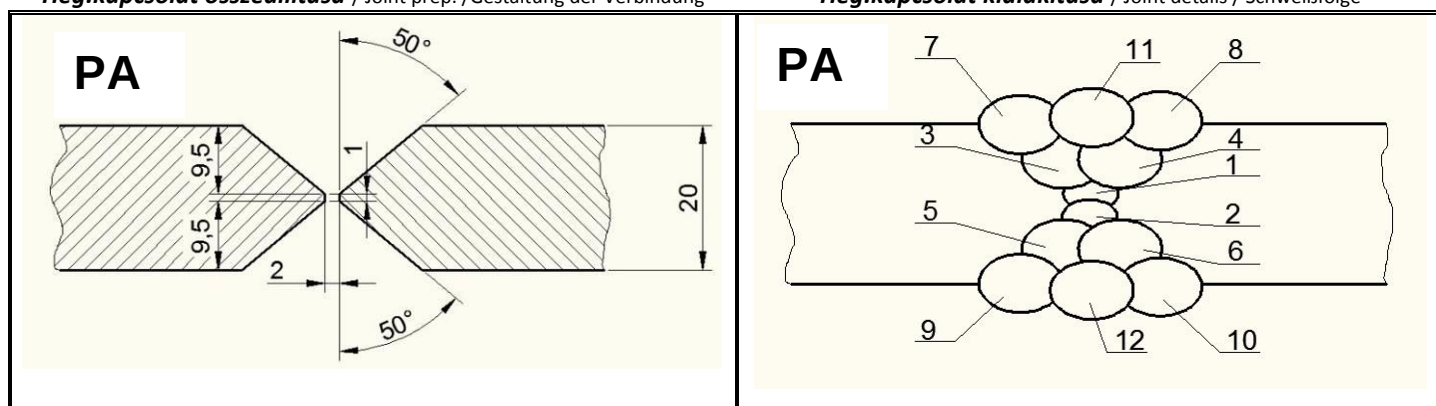
A dolgozatban ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## MELLÉKLET

| HEGESZTÉSI UTASÍTÁS<br>Welding Procedure Specification / Schweissanweisung |                             |                                                                                        |                   |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Hegesztési eljárás:</b><br>Welding procedure / Schweiss-Verfahren:      | <b>135</b>                  | <b>Alapanyag:</b><br>Base metal / Grundwerkstoff:                                      | <b>S960QL</b>     |
| <b>WPS száma:</b><br>WPS No / Beleg Nr.:                                   | <b>2014/BW/1</b>            | <b>Anyagvastagság:</b><br>Wth. / Werkstoffdicke:                                       | <b>20 mm</b>      |
| <b>WPAR száma:</b><br>PQR / WPR No.:                                       | -                           | <b>Külső átmérő:</b><br>Outside diameter / Aussendurchmesser:                          | -                 |
| <b>Gyártó:</b><br>Manufacturer / Hersteller                                | <b>ME</b>                   | <b>Élelőkészítés, tisztítás:</b><br>Joint preparation, cleaning / Nahtverb. Reinigung: | <b>Köszörülés</b> |
| <b>Hegesztési eljárás típusa</b><br>Welding Process / Schweißproceß:       | <b>135 MAG</b>              | <b>Hegesztési pozíció:</b><br>Welding position / Schweißposition:                      | <b>PA</b>         |
| <b>Hegesztett kötés típusa</b><br>Joint type / Nahtart                     | <b>kétoldali „X”-varrat</b> | <b>Élkialakítás:</b><br>Joint design / Fugenformverbereitung:                          | <b>BW X</b>       |

**Heg.kapcsolat összeállítása** / Joint prep. / Gestaltung der Verbindung

**Heg.kapcsolat kialakítása** / Joint details / Schweißfolge



**Hegesztés technológiai adatok megadása** / Welding parameters / Einzelheften für das Schweißen

| Varratfelépítés<br>Weld layers<br>Schweisssraupe | Heg.eljárás<br>Welding process<br>Schweisss-<br>Verfahren | Elektróda<br>Electrode<br>Elektrode<br>Ø | Árramerősség<br>Current<br>Stromstärke<br>(A) | Feszültség<br>Voltage<br>Spannung<br>(V) | Polaritása<br>Polarity<br>Stromart<br>Polung | Huzalsebesség<br>Wire Feed<br>Drahtvorshub<br>(m/min) | Hegesztési seb.<br>Travel Speed<br>Vorschubge-<br>schwindigkeit<br>(cm/min) | Hőbevitel<br>Heat Input<br>Warme-<br>einbringung<br>(kJ/mm) |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1                                                | 135                                                       | 1,2                                      | 96                                            | 17,3                                     | DC+                                          | 2,9                                                   | 11                                                                          | 0,72                                                        |
| 2                                                | 135                                                       | 1,2                                      | 194                                           | 22                                       | DC+                                          | 3,7                                                   | 27                                                                          | 0,76                                                        |
| 3-6                                              | 135                                                       | 1,2                                      | 307                                           | 29                                       | DC+                                          | 10                                                    | 45                                                                          | 0,96                                                        |
| 7-12                                             | 135                                                       | 1,2                                      | 304                                           | 30                                       | DC+                                          | 10                                                    | 45                                                                          | 0,98                                                        |

**Hegesztőanyag megnevezése és gyártója**

Union X96, G 89 5 Mn4N12,5CrMo, EN12534, Ø1,2 mm

**Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat**

|                                                                                                                           |                                     |                                                                                                     |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Elektróda szárítása</b><br>Electrode draining / Rücktrocknung                                                          | -                                   | <b>Előmelegítés</b><br>Preheat temp. / Vorwärmtemperatur                                            | <b>200 °C</b> |
| <b>Védőgáz</b><br>Shielding gas / Schutzgas                                                                               | <b>82% Ar + 18 % CO<sub>2</sub></b> | <b>Közbenső hőmérséklet</b><br>Interpass Temperature / Zwischenlangentemperatur                     | <b>150 °C</b> |
| <b>Védőgáz mennyisége</b><br>Shielding gas flow rate / Schutzgasmenge                                                     | <b>18 l/min</b>                     | <b>Hőkezelés</b><br>PWHT / Wärmebehandlung u/o Aushärten                                            | -             |
| <b>Volfrámelektrod típusa és mérete</b><br>Type of Tungsten electrode and dimension<br>Wolfrámelektrode, Art. und Durchm. | -                                   | <b>Hőntartási hőmérséklet, idő, hők. eljárás</b><br>Temperature Range / Zeit, Temperatur, Verfahren | -             |
| <b>Gyökmegtámasztás védelem:</b><br>Backing / Einzelh. Ausfugen / Badsicherung                                            | -                                   | <b>Hevítési és hűtési sebesség</b><br>Heat and Cooling Speed / Erwärmungs- und Abkühlrate           | -             |

|                          |                     |                              |                     |                   |                     |
|--------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Németh László            | 2014-04-20          |                              |                     |                   |                     |
| <b>Készítette / Made</b> | <b>Dátum / Date</b> | <b>Ellenőrizte / Chacked</b> | <b>Dátum / Date</b> | <b>Jóváhagyta</b> | <b>Dátum / Date</b> |