

HEGESZTÉSTECHNOLÓGIAI PARAMÉTERABLAK NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTÉSÉNÉL

WELDING LOBE FOR ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS (AHSS)

Gáspár Marcell¹, Dr. Balogh András²

ABSTRACT

The highest strength structural steels belong to the quenched and tempered group (Q+T). By increasing the strength of structural steels, the welding lobe becomes narrow. During the planning of the welding technology for a quenched and tempered high strength steel an extremely narrow welding lobe should be defined. In this paper welding experiments is presented for the determination of a welding lobe, whilst the new development tendencies of high strength structural steels are also highlighted.

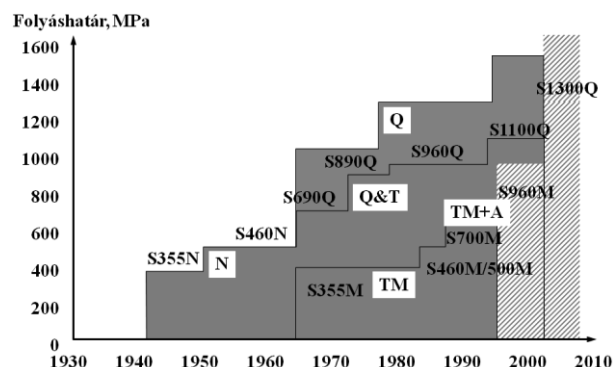
1. BEVEZETÉS

A szerkezeti acélok fejlesztésének meghatározó iránya, amelyet minden acélgyártó alapvető célként kezel, az acélok szilárdságának növelése. A hegeszthető szerkezetek tervezése során gyakran az önsúly csökkentése jelenti az optimalizálási kritériumot, különösen mozgó szerkezetek esetén, ahol az energiatakarékosság mind a költségek csökkentése, mind pedig a környezetvédelmi szempontok miatt is kiemelten kezelendő. A nagyszilárdságú acélok alkalmazásának további előnye lehet a vékonyabb szelvényátmérekkel elérhető anyagmegtakarítás, valamint a csökkenő varratmérettel járó költségcsökkentés a gyártástechnológiában. A járműipar mellett napjainkban még az alkalmazott anyagok szempontjából konzervatívnak tekintett szerkezetek, például hidak esetén is egyre szélesebb körben alkalmaznak nagyszilárdságú acélokat, amelyet gyakran az esztétikai szempontok motiválnak, mivel a nagyszilárdságú acélokkal elérhető karcsúbb szerkezet jobban megnyeri az emberek tetszését. A szerkezeti acélok szilárdságának növelésével azonban a hegesztéstechnológiai paraméter ablak (welding lobe) egyre szűkül, amelyet csak a gyártási követelmények szigorításával, a reprodukálhatóság és a minőségbiztosítás előtérbe helyezésével lehet betartani. A jelen cikkben kísérleti eredményekkel igazolva bemutatjuk ennek a technológiai paraméterablaknak a meghatározását, valamint kitekintést teszünk napjaink nagyszilárdságú acéljainak fejlődési tendenciáira.

2. NAGYSZILÁRDSÁGÚ SZERKEZETI ACÉLOK FEJLŐDÉSÉNEK TENDENCIÁI

A múlt század első évtizedeiben elterjedt, mai besorolás szerinti, S235 jelölésű acéloktól napjainkra eljutottunk az 1000 MPa folyáshatárt elérő, és bizonyos esetekben ezt a szilárdságot meghaladó szerkezeti acélokig.

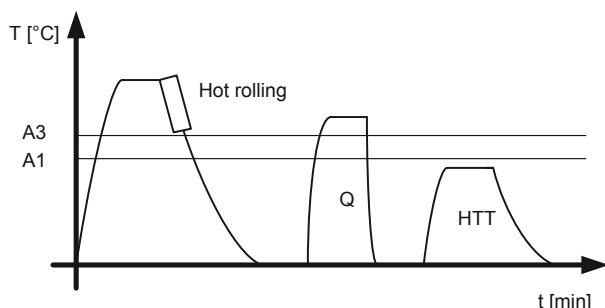
A szerkezeti acélok fejlődését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Nagyszilárdságú acélok fejlődése [6]

A hegesztett szerkezetekben alkalmazott acélok kimagasló szilárdságát ötvözással és különböző termikus és termomechanikus kezelésekkel érik el. A termikus kezelések közül sokáig a normalizálás és a nemesítés volt a lehetőség. Az utóbbi technológiával akár 1300 MPa folyáshatárú szerkezeti acélok is előállíthatók, bár ebben az esetben a szilárdsági tulajdonságok teljes mértékű kiaknázásának gátat szab a hegesztési hozaganyagok korlátozottsága. Ezért ebben az esetben a felhasználóknak csak fokozott, 15-20% „undermatching” elven van lehetőségük hozaganyagot választani. A gyakorlatban ezért inkább szélesebb körben az S960Q jelölésű acélok terjedtek el, amelyekhez napjainkban az alapanyagával lényegében azonos szilárdságú hozaganyagok is rendelkezésre állnak. Érdemes megjegyezni, hogy ennek a hegesztésére is viszonylag kevés üzem vállalkozik Magyarországon. Ezeknek az acéloknak a gyártási folyamatát a 2. ábra szemlélteti.

¹ PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék
² egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék



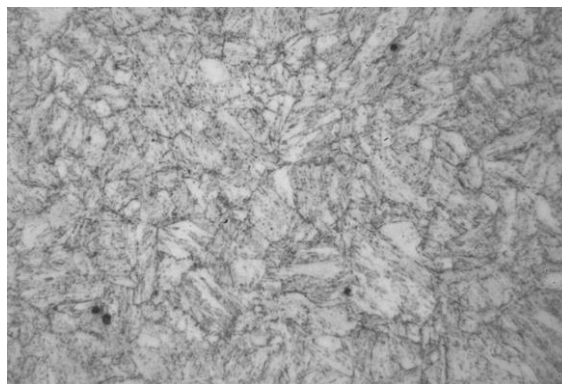
2. ábra. A nemesített nagyszilárdságú acélok gyártási folyamata

Az A3 hőmérséklet feletti meleghengerlést követően viszonylag lassú hűtési sebesség alkalmazásával szobahőmérsékletre hűtik vissza a hengerelt acéllemezt, majd ezt követően újra A3 fölé hevítik, és rövid ideig hűntartják, amíg a teljes keresztmetszet ausztenites szerkezetű lesz. Ezt követően egy edzési folyamat következik, amely során rendkívül intenzív hűtést (pl. vízhűtést) alkalmaznak. Ezért gyakran a szakirodalomban „vizedzésű” nagyszilárdságú acéloknak nevezik ezt a csoportot, valamint az alacsony karbon-tartalom miatt sokszor a „vakedzett” (helyesebben: vaknemesített) jelzővel látják el őket [9]. Az átédzhetőség növelése miatt ezekhez az acélokhöz az átalakulási diagramokat jelentősen jobbra toló ötvözőket, krómot és molibdént adagolnak, illetve az acélgártók gyakran alkalmaznak speciális mikroötvözőket, amelyek közül érdemes külön kiemelni a bórt, amely a szemcsehatáron dúsulva akadályozza a proeutektoidos ferrit kiválását [9]. A rendkívül finom szemcseméret elérése miatt általában további mikroötvözőket (Ti, Nb, V) is adagolnak az acélhoz. Az edzést követően a hőkezelés megeresztési szakaszában A1 hőmérséklet alá hevítik a lemezt, majd egy hűntartást követő lassú lehűtést követően nyeri el az acél végső szövetszerkezetét, amely a kimagasló szilárdsági jellemzők mellett megfelelő szívóssági tulajdonságokkal is rendelkezik. Egy nemesített nagyszilárdságú szerkezetű acél kvázi-nemesített, nem-egyensúlyi szövetszerkezetéről készült optikai mikroszkóppal készült képet mutatja a 3. ábra. A felvételen látható, hogy a martenzit megeresztődése nem teljesen fejeződött be, ugyanakkor megfigyelhetők a rendkívül finom eloszlású apró karbidok.

Napjainkban a szerkezetű acélok fejlesztésekor az igazi kihívás nem pusztán a szilárdság növelésében van, hiszen erre napjainkban a neves acélgártók számos megoldással rendelkeznek. A nehézséget a szívóssági tulajdonságok, és a szilárdság növelésével drasztikusan csökkenő alakváltozóképeség megőrzése jelenti. A fejlesztések gyakori iránya a hegeszthetőségi tulajdonságok javítása, a hegesztéstechnológiai paraméterablak bővítése.

Ezek a célkitűzések motiválták az acélgártókat abban, hogy a nagyszilárdságú szerkezetű acélok előállításához a 2. ábrán ismertetett gyártástechnológia mellett

más eljárásokat is kifejlesszenek. A továbbiakban két neves acélgártó, a RUUKKI és a VOESTALPINE alternatív nagyszilárdságú acéljait mutatjuk be.



3. ábra. A svéd SSAB által gyártott WELDOX960 (S960QL) nem egyensúlyi szövetszerkezete, $N=1000\times$, 2% HNO_3

Az egyik ilyen lehetséges megoldás a RUUKKI által kifejlesztett, tulajdonképpen edzett állapotú szerkezetű acélok [6], amelyeket az 1. ábra zölddel jelölt tartománya szemléltet. Ezeknek az acéloknak a gyártásakor a meleghengerlést követően közvetlenül intenzív hűtés alkalmazásával edzésnek (az edződéshez szükséges karbonkoncentráció hiánya miatt vakedzésnek) vetik alá a lemezeket, amit követően egy jóval az A1 hőmérséklet alatti alacsony hőmérsékletű megeresztés követ. Így tulajdonképpen a 2. ábrán bemutatott három helyett ezeknek az előállítására két hőciklus igényel. Ezért a hőkezelés jellegére utalóan ezeket az acélokat a gyártó gyakran ún. direkt edzett acéloknak nevezi, illetve a gyártástechnológia különbözőségére utalva QC jelöléssel látja el őket. Ezeknek az acéloknak a szövetszerkezete tisztán martenzites és bainites, a megeresztés hiánya miatt pedig kiválások alig fordulnak elő a szövetszerkezetben. A hegeszthetőség szempontjából érdemes kihangsúlyozni, hogy karbonegyenértékük az ismert többi nemesített nagyszilárdságú acélhoz képest jóval kisebb ($CEV_{max, S960QC}=0,57$; $CEV_{max, S960Q}=0,82$) mivel csekély karbon-tartalmuk mellett egyáltalán nem tartalmaznak krómot és molibdént. Ezeknek az acéloknak az előnyei között szerepel az alacsony karbon-tartalomból és karbonegyenértékből adódó kedvező hegeszthetőségi tulajdonságok, valamint az alapanyag gyártása során felmerülő kevesebb energiafelhasználásból (három hőciklus helyett kettő, HTT helyett LTT) és a csekélyebb ötvöző tartalomból eredő költségmegtakarítás, amely a forgalmazott acélok árában is megmutatkozik [6]. Az olyan előnyös tulajdonságok, mint a kisebb hidegpedési hajlam és az ebből adódó 10 mm lemezvastagság alatt akár teljesen elkerülhető (költségesnek tekintett) előmelegítés, valamint a kedvezőbb alapanyag beszerzési ár mellett, ezeknek az acéloknak a hegesztésekor több kedvezőtlen

jelenségre is számítani kell. Mivel a szövetszerkezet meghatározó része martenzit, ezért a hegesztés során a hőhatásövezet 450°C és A3 °C közé hevült zónáiban a martenzit megeresztődéséből adódó jelentős mértékű kilágyulásra kell felkészülni. Ennek mértéke a megeresztődést gátló ötvözők (pl. Mo) hiánya tovább erősíti. Ebből kifolyólag ezeknek az acéloknak a hegesztéséhez kis vonalenergiájú hegesztő eljárásokat (lézer-VFI hibrid, impulzus VFI) célszerű alkalmazni. Ezáltal érhetjük el a RUUKKI előírásaiban erre az acélokra megkövetelt 4 s $t_{8,5/5}$ hűlési időket betartását. Rövid hűlési időket eredményez, ha a maximális rétegek közötti hőmérsékletet szobahőmérsékleten korlátozzuk, viszont ez a termelékenység jelentős romlását eredményezheti. Amennyiben a tervezési előírások megengedik az „undermatching-et”, azaz hogy a varrat szilárdsága az alapanyagétól kisebb legyen, akkor ettől nagyobb hűlési idők (gyártó szerint akár 15 s) is alkalmazhatók, viszont ebben az esetben mind a varrat, mind pedig a hőhatásövezet szilárdsága jelentősen elmarad az alapanyagétól.

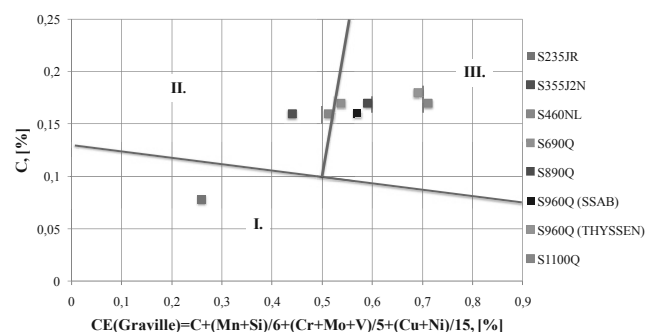
A VOEST-ALPINE által kifejlesztett korszerű nagyszilárdságú acélok az 1. ábra kék színnel jelölt részéhez sorolhatók. Perspektivikus lehet, hogy ezeknek az acéloknak a gyártásakor az ismert termomechanikus kezelést és a nemesítési technológiát ötvözik, így a termomechanikus kezelést követően egy megeresztési folyamat is része a gyártástechnológiának, amely eljárások együttesen a kimagasló szilárdsági tulajdonságot és egyúttal rendkívül jó szívósságot eredményeznek. Kedvezően hat a hegeszthetőségi tulajdonságokra a csekélyebb karbon egyenérték. A gyártó ajánlásai szerint ezek az acélok sokkal szélesebb $t_{8,5/5}$ hűlési időintervallumban (akár 5-20 s) hegeszthetők, ezáltal a termelékenység a gyártás során jelentősen fokozható [7, 8]. A megfelelő hegesztési hozaganyagok kiválasztását segíti, hogy a gyártó együttesen fejleszti a korszerű nagyszilárdságú acéljai mellett a hozzájuk alkalmazható hozaganyagokat is.

3. HEGESZTÉSTECHNOLÓGIA TERVEZÉSE- NEK SZEMPONTJAI

A nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a hagyományos szerkezeti acélokhöz képest eltérő hegesztési koncepcióra van szükség. A 4. ábrán látható Graville diagram a szerkezeti acélokat három csoportra osztja. A diagram megalkotásánál a karbon tartalom definiálásakor és a szilíciumot is tartalmazó Graville-féle karbon egyenérték meghatározásakor az ábra jobb oldalán lévő acéltípusok gyártóktól kapott műbizonylatán szereplő összetételeket vettük alapul.

Az I. övezetbe tartozó acélok gyakorlatilag problémamentesen, minden külön intézkedés nélkül hegeszthetők. Ide sorolhatók az S235 jelzésű acélok. A II. övezet acéljai (S355N, S460N) alulról korlátozott hőbevitellel, a III. övezetbe eső acélok pedig felülről és

alulról limitált hőbevitellel és egyidejű előmelegítéssel hegeszthetők. A Graville diagram alapján a nagyszilárdságú acélok (S690Q-S1100Q) hegesztéséhez előmelegítés és szabályozott vonalenergiájú (helytelenül: szabályozott hőbevitelű) technológia szükséges [1]. Az előző fejezetben ismertetett korszerű nagyszilárdságú acélok kisebb karbon egyenértéke miatt a III. tartomány irányából a II. tartomány felé orientálódnak, ezért a hegesztéstechnológia kidolgozásakor akár az előmelegítési hőmérséklet csökkentését, akár teljes elhanyagolását is mérlegelni lehet.



4. ábra. A szerkezeti acélok hegeszthetőség szerinti felosztása a Graville diagram alapján

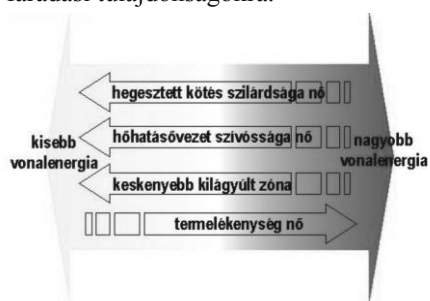
A jelentős karbon egyenértékkel rendelkező nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztésekor az előmelegítés alkalmazásával a ridegedési hajlam, ezáltal pedig a hidegrepedések megjelenésének veszélye jelentősen csökkenthető. Az előmelegítési hőmérséklet meghatározásakor az EN 1011-2 szabvány CET szerinti eljárást érdemes alapul venni. Az így megállapított előmelegítési hőmérsékletet viszont érdemes a számított $t_{8,5/5}$ ismeretében korrigálni, és általában nagyobb hőmérsékletben meghatározni [11].

A nemesített nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések hőhatásövezete meglehetősen inhomogén szerkezetű, ugyanis az alapanyag szilárdságát jelentősen meghaladó keménységcsúcsok (akár 400 HV feletti értékek) figyelhetők meg benne. A hőhatásövezetben kilágyult zóna is előfordul, amely keménysége akár 20 százalékkal is kisebb lehet az alapanyag keménységétől. Többsoros varratfelépítés esetén az újabb hegesztési sorok megeresztő hatása egyértelműen jelentkezik, ezért egyoldali varratok esetén jól megfigyelhető a gyökoldal koronaoldalhoz képesti kilágyulása [11].

Az említett okok miatt a technológia tervezésekor a vonalenergia meghatározását kiemelten kell kezelni. A lehetőségek szerint a vonalenergiát a hegesztési folyamat során egy állandó, alacsony értéken célszerű tartani, mivel csak így garantálható a hegesztett kötés megfelelő szilárdsága és szívóssága (5. ábra).

A technológiai paraméterek gondos meghatározása mellett a nagyszilárdságú acéloknál a megfelelő hozaganyag kiválasztása is kiemelt feladat a

hegesztőmérnök számára. Mivel a technológiai eredetű szilárdságnövelés a hegesztési folyamatban leolvadó hozaganyagok esetében nem alkalmazható, ezért a hozaganyagok szilárdságnövelése csak a mikro- és makroötvezés jól átgondolt kombinációjával lehetséges [1]. Általában a hozaganyagok gyártói jelentősnek mondható (2%) nikkeltartalmú, az alapanyaghoz képest nagyobb mangán, szilícium (esetenként króm) tartalmú huzalokat fejlesztettek ki. Az összetétel mellett a hozaganyag-választás egyik alapvető törvényét jelentő „matching” kérdéskört is kiemelten célszerű áttanulmányozni. Amennyiben a tervezési előírások megengedik, az undermatching elven kiválasztott hozaganyag helyes technológiai stratégiát jelenthet, mivel ebben az esetben kisebb lesz a hidegrepedési hajlam, valamint az undermatching kedvező hatással bírhat a fáradási tulajdonságokra.

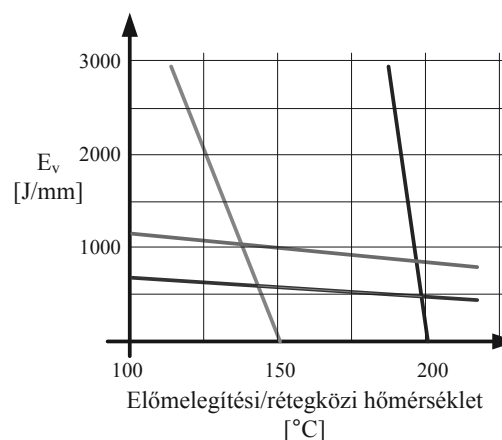


5. ábra. A vonalenergia hegesztett kötés tulajdonságaira és termelékenységre gyakorolt hatása [11]

4. HEGESZTÉSTECHNOLÓGIAI PARAMÉTER-ABLAK MEGHATÁROZÁSA

A hegesztéstechnológiai paraméterablak meghatározását az optimális $t_{8,5/5}$ hűlési idők ismeretében célszerű elvégezni. Ehhez az alapanyaggyártók ajánlásai mellett a különböző szakirodalmak is útmutatást nyújtanak. A szerkezeti acélok szilárdságának növelésével a kritikus hűlési időtartomány egyre szűkül. Míg egy S355 jelölésű acélra egyes gyártók ajánlásai szerint akár 2 és 80 s közötti $t_{8,5/5}$ hűlési idők is megengedhetők, addig a későbbi kísérletekben is alkalmazott S960Q esetén ez az intervallum 5-15 szekundumra szűkül, amelynél gyakran még szűkebb tartományt (6-10 s) ajánlanak a felhasználók [5]. Az egyik alapanyaggyártó, a svéd SSAB által kifejlesztett WELDCALC elnevezésű szoftver alkalmas a hegesztéstechnológiai paraméterablak (ISO szabvány szerinti megnevezésével: welding lobe) megrajzolására. Jelen cikkben korábbi [3,4], és jelen cikkben bemutatott kísérleteink alapján ezt a paraméterablakot fejlesztettük tovább, amelynél a CET szerinti minimális előmelegítési hőmérsékletet és a szűkebb (6-10 s) hűlési időket vettük alapul. Az S960Q nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acél adott lemezvastagsághoz ($s=15$ mm) és kötéskialakításhoz (egyoldali tompakötés, PA hegesztési pozíció) tartozó

hegesztéstechnológiai paraméterablakát a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra. Az S960Q nemesített szerkezeti acélhoz tartozó hegesztéstechnológiai paraméterablak ($s=15$ mm, $CET=0,37$, egyoldali tompakötés)

A diagram függőleges tengelyén a vonalenergia, vízszintes tengelyén pedig az előmelegítési, illetve a rétegekzi hőmérséklet szerepel. A narancssárgával jelzett vonal a CET szerinti minimális előmelegítési hőmérsékletet jelöli, a feketével jelzett vonal pedig a maximális rétegekzi hőmérsékletet. A pirossal és kézzel jelzett görbék a $t_{8,5/5}$ hűlési idők optimális időintervallumának alsó (6 s) és felső (10 s) határértékéhez tartozó vonalenergia, illetve előmelegítési/rétegekzi hőmérséklet értékek halmazát jelölik. A négy görbe által határolt tartomány a hegesztési munkaterület. Amennyiben a hegesztési paramétereket a tartományon kívül eső, fekete és pirossal jelölt egyeneseken túli pontok halmazából választjuk ki, akkor a hegesztett kötés szívóssági és szilárdsági tulajdonságai kedvezőtlenül alakulnak. A narancssárga egyenestől balra, illetve a kéktől lentebb eső pontok esetén pedig hidegrepedés veszélye áll fenn.

5. HEGESZTÉSI KÍSÉRLETEK A KRITIKUS $T_{8,5/5}$ HŰLÉSI IDŐTARTOMÁNY MEGHATÁROZÁSÁRA

A hegesztési munkaterület, illetve az optimális hűlési időtartomány igazolásához hegesztési kísérleteket végeztünk. Alapanyagként a svéd SSAB által gyártott WELDOX 960 nemesített nagyszilárdságú acéllemez, hozaganyagként pedig az UNION X96 márkajelzésű 1,2 mm átmérőjű huzalelektrodát választottuk. Az eljárás védőgázos fogyóelektrodás ívhegesztés (ISO 135) volt, védőgáznak pedig M21 (82% Ar + 18% CO₂) besorolású kevert gázt alkalmaztunk. A kísérletek során a korábbi fejezetekben ismertetett szempontok szerint 15 mm vastagságú lemezek egyoldali tompakötését készítettük el. A hegesztés a reprodukálhatóság és a hegesztési paraméterek konstans értéken tartása miatt

robotizált körülmények között történt. Két hegesztési próbát készítettünk, amelyek közül az egyik esetében a hegesztési paramétereket úgy határoztuk meg, hogy a számított $t_{8,5/5}$ hűlési idők minden hegesztési sor esetén az optimális tartomány alsó értékére, azaz 6 s-ra adódjanak. A másik próba esetén a hegesztési sebesség csökkentésének kivételével minden technológiai paramétert változatlanul hagytunk, így a hűlési idők pedig a töltő- és takarósorok esetén 10 s-ra adódtak. A gyöksor esetén a túlzott gyökátfolyás, a második sor esetén pedig az átrokadás elkerülése érdekében a vonalenergiát mindkét esetben alacsony értékben határoztuk meg. A kísérletek során a hegesztési paraméterek dokumentálása céljából folyamatfelügyelő rendszert alkalmaztunk. A hegesztési próbák elkészítéséhez alkalmazott hegesztési paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

| I. próba | | | | | | |
|-----------|-------------------------|-----------------------|----------|----------|-----------------|--------------------|
| Sor | $T_{elő/réteg}$ [°C] | v_{heg} [cm/min] | I [A] | U [V] | E_v [J/mm] | $t_{8,5/5}$ [s] |
| gyök | 190 | 18 | 117 | 18,5 | 600 | 5,5 |
| 2. | 150 | 41 | 247 | 24,6 | 700 | 6 |
| 3-9. | 150 | 55 | 285 | 27,8 | 700 | 5 |
| II. próba | | | | | | |
| gyök | 190 | 18 | 117 | 18,5 | 600 | 5,5 |
| 2. | 150 | 41 | 247 | 24,6 | 700 | 6 |
| 3-7. | 150 | 38 | 289 | 27,7 | 1000 | 10 |

1. táblázat. Hegesztési paraméterek

A hegesztést követően az MSZ EN ISO 15614 szerint előírt roncsolásos vizsgálatok közül, az alábbiakat végeztük el:

- szakítóvizsgálat,
- ütővizsgálat,
- keménység/makrovizsgálat.

A szakítóvizsgálat eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

| | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A_5 [%] |
|-----------|------------------|-------------|-----------|
| WELDOX960 | 1007 | 1045 | 16 |
| UNIONX96* | 930 | 980 | 14 |
| 1. próba | - | 1030 | - |
| 2. próba | - | 977 | - |

* A szabvány által megkövetelt minimális érték.

2. táblázat. Szakítóvizsgálat eredményei

Az alapanyag szilárdsági jellemzői a gyártó által kiállított műbizonylatról származnak. A huzalelektroda műbizonylatán sajnos csak a vonatkozó szabvány által előírt minimum értékek voltak feltüntetve. Az optimális $t_{8,5/5}$ hűlési időtartomány alsó határértékét eredményező kis vonalenergiával készült első hegesztési próba teljesítette az MSZ EN 15614 szabvány követelményét, amely az alapanyagra vonatkozó szakítószilárdság tartomány alsó határát, jelen esetben a 980 MPa-t írja

elő. Ezzel szemben a második próba szakítószilárdsága kis mértékben ugyan, de elmarad a követelménytől.

A hivatkozott szabvány követelményei szerint a varratból és hőhatásövezetből kimunkált próbatestek ütőmunka átlagának teljesítenie kell az alapanyagra vonatkozó követelményt. Az elvégzett ütővizsgálat eredményeit foglalja össze a 3. táblázat. A varratból és a hőhatásövezetből kimunkált 3-3 db próbatest ütőmunkája biztonsággal teljesítette a -40 °C vizsgálati hőmérsékleten előírt 30 J követelményt. Ebből következik, hogy a vizsgált hűlési időközben készült hegesztett kötések esetén a kívánt szívóssági tulajdonságok megőrizhetők.

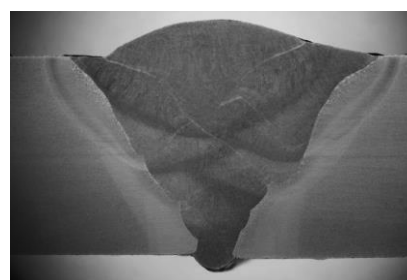
| | I. próba | II. próba |
|---------|----------|-----------|
| VWT 1 | 45 J | 42 J |
| VHT 1/1 | 48 J | 37 J |

3. táblázat. Ütővizsgálat eredményei

A hegesztett kötésről készült makrofelvételeket a 7. és 8. ábra mutatja. Az ábrákon megfigyelhető az I. próbánál előforduló kilenc- és a nagyobb vonalenergiával készült, ezáltal kiterjedtebb hőhatásövezettel rendelkező II. próba hétsoros varratfelépítése.



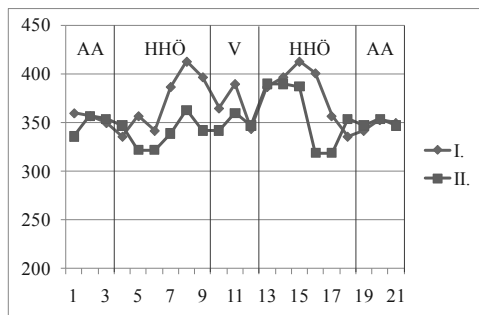
7. ábra. Az I. hegesztési próbáról készült makrofelvétel, 2% HNO₃



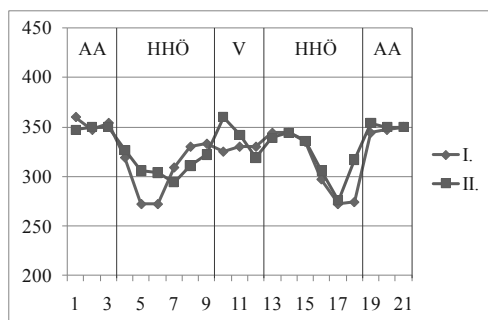
8. ábra. A II. hegesztési próbáról készült makrofelvétel, 2% HNO₃

A makrofelvételek elkészítését követően keménységmérést végeztünk a csiszolatokon, amely során HV10 eljárás szerint készítettük el a lenyomatokat. Az MSZ EN ISO 15614 követelménye szerint a 3. acélcsoportra a maximálisan megengedhető keménység 450 HV. A 9. ábrán látható, hogy még a rövidebb hűlési idővel hegesztett darabokon sem éri el a keménység ezt a határértéket. A koronaoldal hőhatásövezetében jól megfigyelhetők a nemesített nagyszilárdságú acélokra

jellemző keménységcsúcsok, illetve kilágyult zónák. Ezzel szemben a gyökoldalon a gyöksort követően elkészített hegesztési sorok megeresztő hatása miatt az alapanyagénál nagyobb keménységet nem mértünk, illetve a kilágyulás mértéke nagyobb volt, mint a koronaoldal esetén.



9. ábra. A hegesztési próbák korona oldalának keménység eloszlása



10. ábra. A hegesztési próbák gyökoldalának keménység eloszlása

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A hegesztett szerkezetekben alkalmazott acélok közül a legnagyobb szilárdsági tulajdonságokkal továbbra is a nemesített állapotú acélok rendelkeznek. Ezeknek az acéloknak a hegesztése a hagyományos acélokhöz képest más szemléletet igényel, ugyanis egy meglehetősen szűk hegesztéstechnológiai paramétertartomány áll a hegesztőmérnökök rendelkezésére.

A hegesztéstechnológia tervezésekor a $t_{8,5/5}$ hűlési idők képezik a technológia tervezésének alapját. Az S960Q acélok hegesztésekor az optimális hűlési időintervallum jelentősen, akár 6-10 szekundumra is szűkülhet, amelyet a cikkben bemutatott kísérletek is igazolnak. Amennyire pedig a lehetőségek engedik, a kívánt szilárdsági jellemzők megőrzése miatt e hűlési időköz alsó határértékéhez célszerű közelíteni.

Napjainkban a szerkezeti acélok fejlesztői több megoldást is kidolgoztak, amelyek a hegeszthetőségi tulajdonságok javítását, a hegesztési munkaterület bővítését és bizonyos esetekben akár a költségek csökkentését is lehetővé teszik. Ezeknek az acéloknak a hegesztése még

számos kihívást tartogat, mivel egyelőre még nem állnak rendelkezésre széleskörű felhasználói ismeretek a hegesztett szerkezetekben való alkalmazhatóságukról.

7. IRODALOM

- [1] Balogh, A.; Gáspár M.: Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója, *Hegesztéstechnika*, 2012/III., p.: 23-28.
- [2] Balogh, A.; Török, I.; Gáspár, M.; Juhász, D.: Present state and prospective developing directions of advanced high strength steels, University of Miskolc, Department of Materials Processing Technologies, *Journal of Production Processes and Systems*, Volume 5. No. 1., 2012, p.: 79-90.
- [3] Gáspár, M.; Balogh, A.: Experimental Investigation on the Effect of Controlled Linear Energy Applied to the Welding of High Strength Steels, 26th microCAD, Miskolc, 2012
- [4] Gáspár, M.; Balogh, A.: A vonalenergia optimális tartománya nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztésekor, 26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás, Budapest, 2012, p.: 173-178
- [5] Sas, I.: Növelt folyáshatárú acélok hegesztésének gyakorlati tapasztalatai a RUUKKI Tisza Zrt.-ben, BMF CLOOS Szimpózium, Budapest, 2009.
- [6] <http://www.ruukki.com/optimqc>
- [7] Rauch, R.; Schnitzer, R.: The world's first system for high-strength welded structures, 1st alformR welding day, Linz, Austria, 2012.
- [8] Klein, M.; Sonnleitner, M.; Stiaszny, P.: alform x-treme innovation, 1st alformR welding day, Linz, Austria, 2012.
- [9] Szunyogh, L.: Hegesztés és rokon technológiák. Kézikönyv, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007, p.: 436-437.
- [10] Komócsin, M.: Nagyszilárdságú acélok és hegeszthetőségük, *Hegesztéstechnika*, 2002/III. p. 5-9.
- [11] Gáspár M.; Balogh A.: Feszítható technológiai határok nemesített nagyszilárdságú acélok ívhegesztésekor, Hegesztési Felelősök XIV. Országos Konferenciája, Hajdúszoboszló, 2012.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A hegesztési kísérletekhez való hozzájárulásukért köszönetet mondunk a RUUKKI Tisza Zrt.-nek és a FROWELD Kft-nek.