

A vonalenergia hatása a nemesített, nagyszilárdságú acél vastaglemezek hegesztett kötéseire

**The effect of linear energy on the welding of quenched and tempered
high strength steels with heavy plate thickness**

Szerző: Dobosy Ádám

2012/13 ősz

Szak: Gépészmérnök MSc - Hegesztéstechnológia Szakirány

Miskolci Egyetem - Mechanikai Technológiai Tanszék

Témavezető: Dr. Balogh András - ny. egyetemi docens

Konzulens: Gáspár Marcell Gyula - PhD hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. A nagyszilárdságú acélok jelentősége	1
3. A nagyszilárdságú acélok hegeszthetősége	6
4. A hegesztési kísérletek bemutatása	13
5. A hegesztési kísérletek kiértékelése	22
6. Következtetések	28
Irodalomjegyzék	30
Köszönetnyilvánítás	31

1. BEVEZETÉS

Mai világunkban a különböző szerkezetek, szerkezeti elemek és így a bennük alkalmazott anyagok egyre nagyobb igénybevételnek vannak kitéve. Emellett a gazdasági követelmények arra kényszerítik a mérnököket, hogy az anyagok terhelhetőségét még tovább növeljék az önsúly egyidejű csökkentése mellett. Ennek az összetett feltételnek igyekeznek megfelelni a nagyszilárdságú acélok.

A nagyszilárdságú acélok esetében a kimagasló szilárdsági tulajdonságokat ötvözők alkalmazásával és speciális gyártástechnológiával érik el. A meleghengerlés és az azt követő hőkezelés (edzés (Q) és magas hőmérsékletű megeresztés (HTT)) után kialakult nemegyensúlyi szövetszerkezetből következik, hogy ezen anyagok hegesztése során rendkívül nagy figyelemmel kell lenni az alkalmazott technológiai paraméterekre, annak érdekében, hogy az alapanyag nagy szilárdságát és szívósságát adó szövetszerkezetet a lehető legkisebb mértékben változtassuk meg. Ez rendkívül nagy figyelmet és körültekintést követel meg mind a hegesztőmérnöktől, mind a gyártás során a hegesztő szakembertől. A hegesztés hőciklusa az alapanyag nem egyensúlyi szövetszerkezetét visszafordíthatatlanul megváltoztathatja. Ez a hatás a hőhatásövezetben és többsoros varratfelépítés esetén a varratban is jelentkezhet, ahol jelentős inhomogenitás tapasztalható a mechanikai tulajdonságokban, a szilárdságban és szívósságban. A hegesztési hőciklus a legtöbb esetben kedvezőtlenül hat a hegesztett kötés tulajdonságaira, mivel a beedződésre utaló keménységcsúcsok, illetve a kilágyulást jelentő keménység minimumok jelentkezhetnek a hőhatásövezetben. A sikeres kötéshez olyan eljárás illetve munkarend szükséges, amely a lehető legkisebb mértékben és térbeli kiterjedésben módosítja a szövetszerkezetet, ennek kulcsa pedig a szabályozott, kis értékű vonalenergia pontos meghatározása és betartása.

Ezen acélok egyik igen jellegzetes felhasználási területe a mobildaruk gyártása. Ezen a területen Magyarországon az egyik vezető gyártó a RUUKKI Tisza ZRt, ahol az alkalmazott lemezvastagság akár 100 mm-ig is terjedhet. Az egyik igen jellemző szilárdsági osztály pedig a 690 MPa garantált folyáshatárral rendelkező nemesített acélok csoportja.

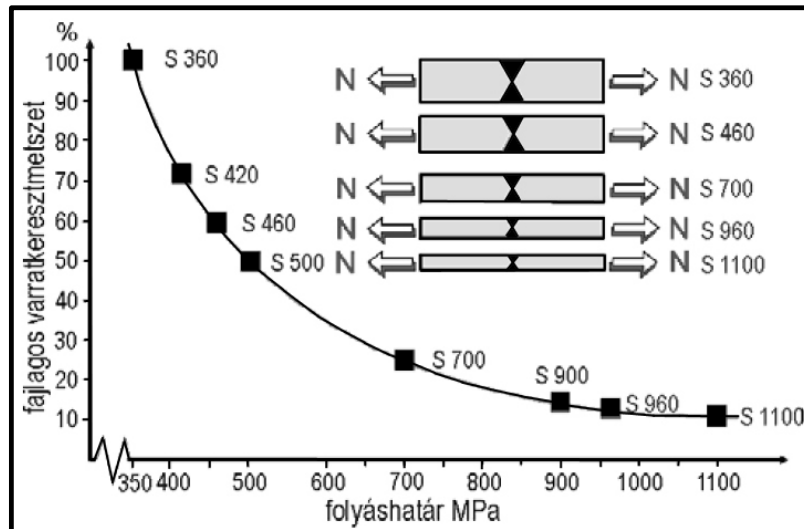
Ennek megfelelően a jelen dolgozat azt vizsgálja, hogy vastaglemezek esetén ($s = 60 \text{ mm}$) milyen hatással van a vonalenergia a lemezek kritikus hűlési idejére ($t_{8,5/5}$) és így a hegesztett kötés mechanikai tulajdonságaira. Ennek vizsgálatára, a technológiai paraméterek állandósága érdekében hegesztőrobot alkalmazásával, két hegesztési kísérletet hasonlítottam össze. Az így elkészült kötések eljárásvizsgálatnak vetettem alá az MSZ EN ISO 15614 szabványnak megfelelően, végül a kapott eredmények tükrében megállapításokat vontam le a vonalenergia szerepével kapcsolatban.

2. A NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK JELENTŐSÉGE

Napjaink korszerű mérnöki szerkezetei és eszközei szinte elképzelhetetlenek valamilyen hegesztett kötés nélkül. Ilyenek például az acélszerkezetek: hidak, nagy teherbírású mobil daruk, gépjárművek. Ezen szerkezeteket használatuk során gyakran igen nagy mechanikai igénybevételek terhelik. Ezeket a gyártmányokat, nagy terhelésükből adódóan, az üzemeltetésük szempontjából nem éri meg kisebb

folyáshatárú, azaz kisebb szilárdságú acélokból elkészíteni, hiszen ebben az esetben az alkalmazott szelvényátmérők, ebből adódóan pedig a szerkezet súlya túlságosan nagy lenne.

Itt kap fontos szerepet a nagyszilárdságú, esetleg az ultra nagyszilárdságú acélok alkalmazása. Ilyen esetben ugyanis csökkenthető az alkalmazott szelvényátmérő, a szerkezet önsúlya, ezzel együtt pedig az alkalmazott varratok tömege is. Ez, a gazdaságossági előnyök mellett, előnyös a szerkezet mechanikai tulajdonságai miatt is. Általánosságban elmondható hogy csökkenő keresztmetszet hatására azonos terhelés mellett a folyáshatár növelhető (1. ábra) [1].



1. ábra: A varratkeresztmetszet és a folyáshatár kapcsolata [6]

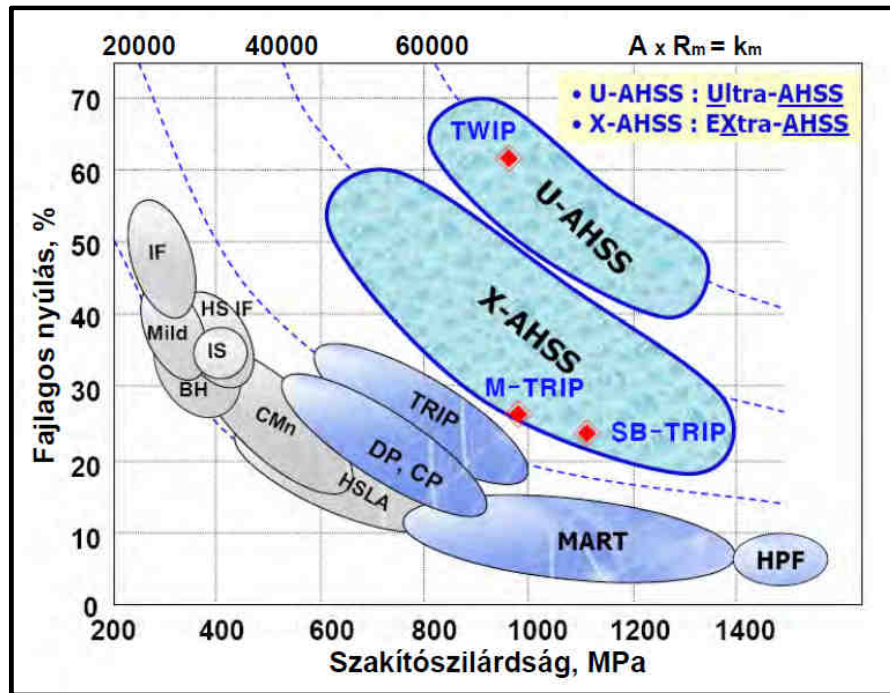
Ennek megfelelően napjainkban fontos terület annak kutatása hogyan növelhető a már meglévő nagyszilárdságú acéltípusok alkalmazhatóságának köre. Jelenleg leginkább a nagyszilárdságú acélok alkalmazási területe olyan tartószerkezetek, amelyeknél a statikus szilárdság a mértékadó, a stabilitási és fáradási kritériumoknak pedig csak mellékes szerepük van a méretezés során.

Fontos szerepet kapnak a nagyszilárdságú acélok olyan szerkezetek építésénél, mint például a mobildaruk, amelyeknek sokszor igen nagy terhelést, emellett igen extrém környezeti hatásokat is el kell viselniük (negatív hőmérsékleten üzemelés), de ezen acélok nélkülözhetetlenek a hajógyártásban is, vagy akár a személygépkocsi gyártás területén.

A nagyszilárdságú acéloknak többféle előállítási módja van és ennek megfelelően több típusú nagyszilárdságú acél is rendelkezésre áll a piacon. Jelen dolgozatban a finomszemcsés, nemesített nagyszilárdságú acélok vizsgálatával foglalkozom. Azért esett erre a típusra a választás, mivel a nagyszilárdságú acélok egy igen jelentős része finomszemcsés szerkezetű, ezek közül pedig a nemesített acélok esetében érhető el a legnagyobb szilárdság. A kísérleteimnek helyet adó RUUKKI Tisza Zrt.-nél is a növelt szilárdságú acélok közül ezen acélok felhasználása a legnagyobb.

Fontos már a legelején megjegyezni, hogy a nagyszilárdságú acélok fogalma nem egyértelmű, ezt szabvány egységesen nem rögzíti. Ugyanakkor az Európai Unió területén, így Magyarországon is az EN 10025-6 szabvány nagyszilárdságúnak tekinti

a 460 és 960 MPa közötti folyáshatárral rendelkező acélokat. Ennek megfelelően azon acélokat, amelyek folyáshatára nem éri el a 460 MPa-t kis vagy közepes szilárdságúaknak, a 460 és 960 MPa tartományba eső acélokat nagyszilárdságúaknak, még a 960 MPa-t meghaladó értékkel rendelkezőket ultra nagyszilárdságúaknak nevezhetjük. A 2. ábrán látható diagram a fajlagos nyúlás és a szakítószilárdság alapján helyezi el a nagyszilárdságú acélokat. A továbbiakban én az említett európai szabvány besorolását veszem alapul, ennek megfelelően vizsgálom tovább a nagyszilárdságú acélok csoportját.

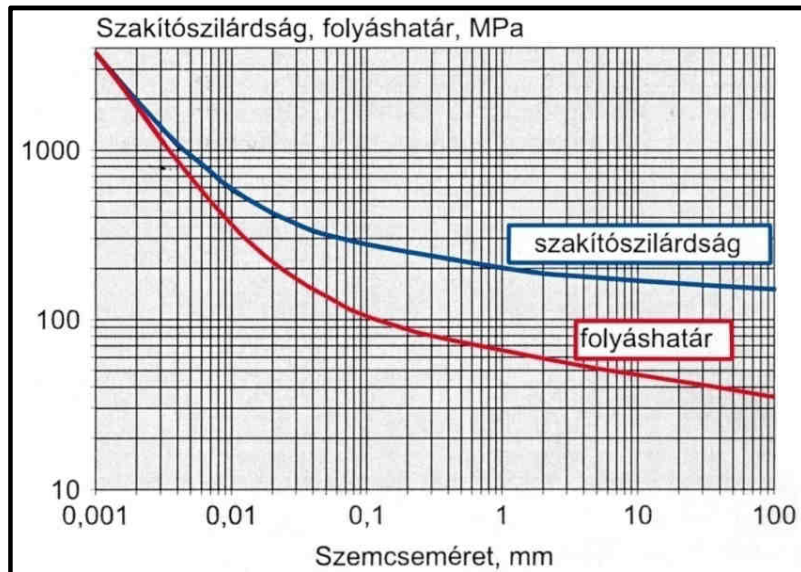


2. ábra: Acélok osztályozása a szakítószilárdság és a nyúlás függvényében [8]

Amint az régóta ismert a folyáshatár értékét és a szívósságot meghatározza: a jelenlévő fázisok aránya, az alkotó fázisok tulajdonságai, valamint a szövetet alkotó fázisok, vagyis a szemcsék mérete, alakja és eloszlása.

A folyáshatár növelésének egyik leghatékonyabb módja a **szemcseméret csökkentése**. Ebben az esetben változatlan vegyi összetétel mellett is növelhető az anyag folyáshatára. A nagyszilárdságú acélok fogalmát leginkább ebbe a csoportba eső acélok fedik le, hagyományosan ezekkel az eljárásokkal érhető el a legnagyobb szilárdság. A finomszemcsés acélok előállításának, vagyis a szemcseméret csökkentésének több módja is ismert. Ide sorolhatók a normalizált, vagy normalizáló hengerléssel gyártott acélok; a termomechanikus alakítással gyártott acélok; a nemesített, nagy folyáshatárú acélok; valamint a kiválóan keményített szerkezeti acélok.

Természetesen más hatékony szilárdságnövelő eljárások is léteznek, az ezekkel előállított acélok azonban már az ultra nagyszilárdságú kategóriába tartoznak (TRIP, TWIP acélok). Mivel az így készült acélok jellemzően vékonylemezek, vastagságuk mindössze néhány mm, alkalmazási területük pedig jellemzően a járműipar karosszériaelemei így ezekkel jelen dolgozatomban nem foglalkozom.

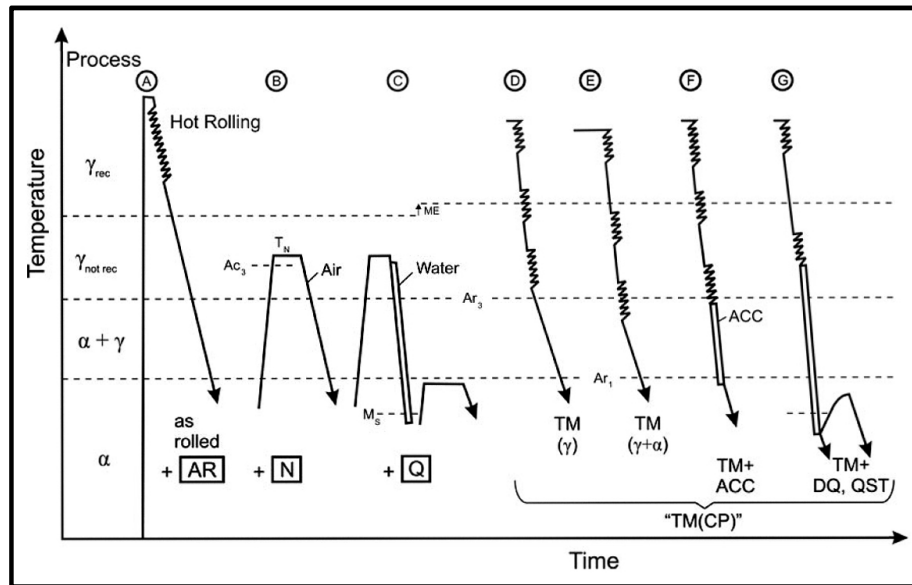


3. ábra: A szemcseméret hatása a szilárdsági jellemzőkre [7]

Egy adott térfogatban a szemcseméret csökkentése együtt jár a szemcsehatár valamint a fázishatár összes felületének növekedésével. Ez egyúttal az anyag belső energiájának növekedését is jelenti. A szemcseméret, illetve a szemcseszám növelése fokozható, ha több csírán indul meg a kristályosodás egy időben. Ez a kristályosodó rendszer esetén leginkább a nagyobb túlhűtéssel érhető el. Egyúttal gyorsabb kristálynövekedést, ezzel együtt pedig nagyobb mértékű rácsrendezetlenséget is megfigyelhetünk. Mindezen rendezetlenségek energianövekedéssel járnak, amik bizonyos tulajdonságok változását okozzák. Tehát a szemcseméret csökkentésével járó szemcsehatár rendezetlenség és rácsrendezetlenség növekedésével a szilárdsági jellemzők, különösen a folyáshatár, arányosan növekszik (lásd 3. ábra). Emellett a szemcseméret csökkentés további kedvező hatása, hogy nő az ütőmunka értéke, miközben az átmeneti hőmérséklet csökken [2].

A finomszemcsés szerkezeti acélok, mint a normalizálással, vagy normalizáló hengerlés előállított; a termomechanikus kezeléssel gyártott; a kiválóan keményített; valamint a nemesített nagyszilárdságú acélok előállítási módjait foglalja össze a 4. ábra. Ezen acélok közül kiemelkedő szerepe van a kísérleteim szempontjából a nemesített, nagyszilárdságú acéloknak.

A finomszemcsés acélok közül ezek rendelkeznek a lehető legnagyobb szilárdsági értékekkel, folyáshatáruk garantált értéke akár 960 MPa is lehet, így a gyártási technológiától függően folyáshatáruk meghaladhatja az 1000 MPa-t is. A nemesített szerkezeti acélok azonban elég széles tartományt lefednek, így gyártanak 460 MPa folyáshatár értékkel is ilyen acélokat, ezeket elsősorban nagyobb kopásállóságot igénylő alkalmazásra.



4. ábra: Növelt szilárdságú szerkezeti acélok előállítási módjai [9]

Gyártásuk, hasonlóan a többi finomszemcsés acélhoz meleg alakítással kezdődik ausztenites tartományban, 1100 °C közelében, majd a levegőn való hűtést követően kerül sor egy újbóli A_{c3} feletti felhevítésre, és az azt követő edzésre (Quenching), amely során vízhűtés alkalmazásával érik el a martenizites szerkezethez szükséges hűlési sebességet. Egy újbóli felhevítéssel, amelynek hőmérséklete jellemzően A_1 alatti, érhető el a kívánt szövetszerkezet és szemcseméret, azonban minél nagyobb ennek a megeresztésnek (Tempering) a hőmérséklete, az edzés során elért szilárdság annál inkább csökken [5] (4. ábra A+C görbéje) Az így kapott szövetkép az 5. ábrán látható.



5. ábra: Nemesített, nagyszilárdságú (S690QL) acél szövetképe (Marószér: 2% HNO_3 , Nagyítás 200x)

Karbondtartalmuk kicsi, nem haladja meg a 0,2%-ot, emellett fő ötvözőik a mangán, króm, nikkel, molibdén és a bór. Ezek közül jelentős szerepet tölt be a bór, mert erős nitrid- és karbidképző. Továbbá hatékonyan növeli az átedzhetőséget, ugyanis az ausztenit szemcsehatárán kívül akadályozza a ferritképződést.

Mennyiségét ugyanakkor nagyon pontosan kell szabályozni (10-30 ppm), ha túl kevés, nem fejt ki hatását kellően, túlzott mértékű ötvözés esetén pedig boro-karbid képződhet, ami a ferritképződést segítve rontja az átedzhetőséget [2]. A bór mellett jelenlévő króm és nikkel szintén növeli az átedzhetőséget, ezek alkalmazása esetén, vízhűtés mellett a szövetszerkezet teljes keresztmetszetben martenzites lesz. Azonban a kis karbontartalom miatt az edzés során keletkezett martenzit csak kisszámú torzult elemi cellát tartalmaz, aminek eredménye, hogy a létrejött martenzit keménysége és ridegsége is csekélyebb, vagyis úgynevezett vakedzésről van szó. Szilárdságuk és szívósságuk azonban, az edzést követő megeresztéssel előállított szemcseszerkezet következtében jelentős.

A kísérleteim során vizsgált S690QL acélcsoport a nemesített, nagyszilárdságú acélok felső kategóriájába tartozik, minimális folyáshatáruk 690 MPa, de akár a 800 MPa értéket is elérheti. Az acél jelölésében lévő „L” pedig arra utal, hogy ez a csoport negatív hőmérsékleten üzemelő berendezésekhez, mint például mobildarukhoz is alkalmas.

3. A NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTHETŐSÉGE

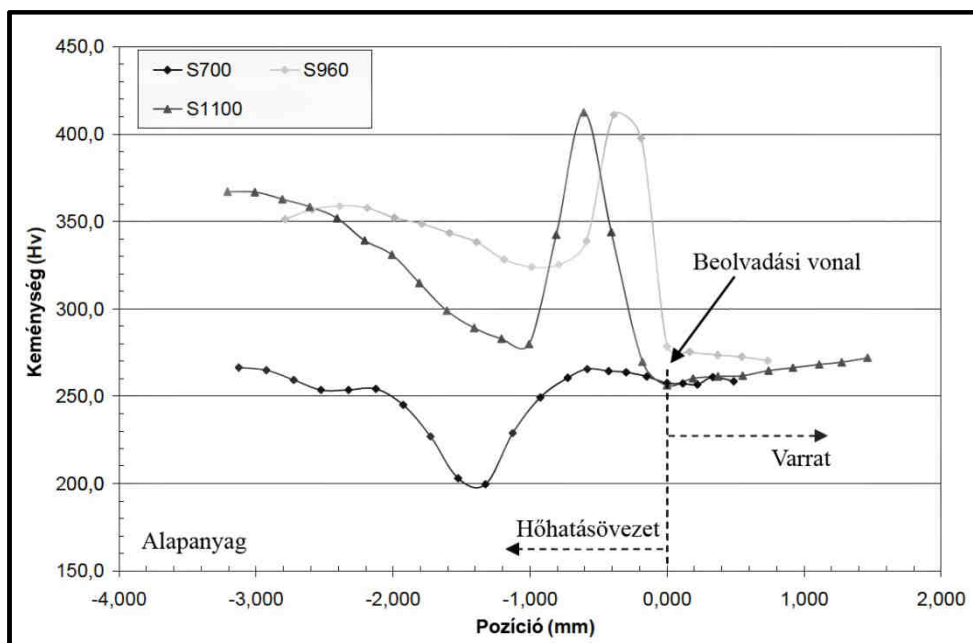
A nagyszilárdságú acélok gyártása során nem-egyensúlyi szövetszerkezet alakul ki, amit a hegesztési folyamat visszafordíthatatlanul megváltoztat, a gyártás során kapott szövetszerkezetet hegesztés után már nem lehet visszaállítani. Általánosságban elmondható, hogy a lejátszódó hőfolyamatok hatására mind a varratban és annak környezetében, a hőhatásövezetben, keménységnövekedés és csökkenés is bekövetkezhet. Ebből következik, hogy szívósság- és szilárdságcsökkenéssel is lehet számolni, amelyek természetesen rontják a kötés tulajdonságait. Előforduló nem kívánatos jelenség lehet hidegrepedések megjelenése, amelyet az edződésre hajlamos alapanyag, a diffúzióképes atomos állapotú hidrogén jelenléte és a hegesztett szerkezetben lévő húzófeszültség együttes hatása okozhat. Így összességében elmondható, hogy olyan hegesztéstechnológiát kell alkalmazni, amellyel az alapanyag előnyös tulajdonságai nem romlanak jelentősen. Vagyis amely a lehető legkisebb mértékben változtatja meg az eredeti szövetszerkezetet és így az eredeti mechanikai tulajdonságokat [4].

Ez azért is fontos mivel általános elvárás a hegesztett kötésekkel szemben, hogy az elkészített varrat a lehető legjobb tulajdonságú legyen. Ez akkor érhető el, ha mind a varrat, mind a hőhatásövezet különböző részeinek tulajdonságai megegyeznek az alapanyag tulajdonságaival. Fontos ez a méretezés során, leginkább a folyáshatár esetén, hiszen nem engedhető meg, hogy a hegesztett szerkezetben jelentős eltérések legyenek a méretezésként szolgáló értékhez képest. A nagyszilárdságú, finomszemcsés acélok esetén megjegyezhető, hogy igen nehéz őket szemcsedurvulás nélkül hegesztetni. Ezért van szükség speciális hegesztéstechnológia kidolgozására, ami csökkenti a hőhatásövezet kiterjedését, illetve minél nagyobb tartományban megőrzi a finom szemcseszerkezetet. Ilyen megfontolás lehet a korlátozott hőbevitel alkalmazása, amelyet a vonalenergia nagyságával lehet befolyásolni, illetve a minél több sorban történő hegesztés.

A szemcsedurvulás oka, hogy a hőhatásövezet 1100 °C fölé hevült térfogataiban az ausztenit szemcsék növekedésnek indulnak. Mint az a 3. ábrán is

látható volt, a szemcsék méretének növekedésével a szilárdsági jellemzők, és így a folyáshatár jelentősen csökken, ami természetesen kedvezőtlen eredmény. Ez a szemcsedurvulás jelentősen mérsékelhető az ausztenit szemcsehatárán valamilyen finom eloszlású, idegen fázis jelenlétével. Ilyen idegen fázis lehet az ausztenitben oldódó, vaskarbidnál (Fe_3C) stabilabb karbid, nitrid vagy karbonitrid. Éppen ezért a nagyszilárdságú acélok esetében mikroötvözőket tartalmaznak. Ilyen ötvözők az alumínium, nióbium, vanádium, titán és a cirkónium.

A nemesített acélok esetében a különböző ötvözőelemek hatására a hőhatásövezet könnyen felkeményedhet, továbbá túl nagy vonalenergia esetén a hőhatásövezet egyes részei az alapanyaghoz képest jobban kilágyulhatnak, ami szilárdság-, illetve keménységcsökkenéssel jár, ezt szemlélteti a 6. ábra. Ennek elkerülése érdekében a munkadarabot hegesztés előtt elő kell melegíteni, és a vonalenergiát is korlátozni kell.



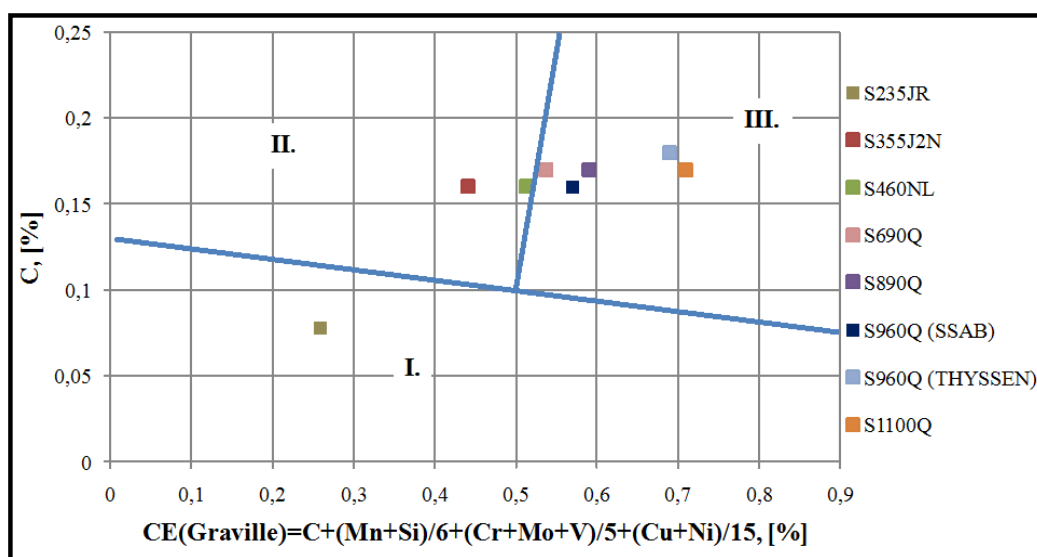
6. ábra: Keménység eloszlás hegesztett kötés mentén [10]

Nagyszilárdságú acélok hegesztése során, kritikus esetben számolni kell repedés megjelenéssel. Jellegzetes repedés megjelenési forma az úgynevezett hidegrepedés, más néven edződési vagy hidrogén okozta repedés.

Mint ismeretes a hegesztést követő rendkívül gyors hűlés martenzites szövetszerkezetet eredményezhet, amely rendkívül rideg és alakváltozásra képtelen. A hegesztés során azonban nem a teljes tömeg melegszik fel, csak a hegesztés közvetlen környezete, ebből pedig az következik, hogy egyenlőtlen lesz a hőmérsékleteloszlás. A hőmérséklet különbség hatására a hőtágulás akadályozott, ami belső feszültségeket eredményez. A kis alakváltozó képességű martenzit azonban ezt képtelen elviselni, így abban repedés alakulhat ki. Ezt a hatást fokozza a diffúzióképes, oldhatósági határt meghaladó hidrogén jelenléte. A hegfürdő a hegesztés során képes abszorbeálni a hidrogén atomokat, a hőmérséklet csökkenésével azonban csökken a hidrogén oldhatósága is, így az ismét képes kiválni. Ennek során a hidrogén a hőhatásövezet irányába diffundálhat, ahol a δ -ferrit és a γ -vas is jelentős hidrogént tud oldatban

tartani, ezeken a helyeken pedig rekombináldhatnak az atomok. Itt annyira megnő a gáznyomás, hogy a szemcsék közötti kötés helyileg felszakad, ennek következménye pedig mikro és makro pólusok keletkezése. Az alakváltozásra kevésbé képes martenzites szövetszerkezetben ez a repedések megjelenésének valószínűségét növeli. Ez a túltelített hidrogéntartalom különösen a 460 MPa-t meghaladó folyáshatárú acélok esetében, és így a nemesített, nagyszilárdságú acéloknál jelent repedési kockázatot.

A hidegrepedés elkerülésének legkézenfekvőbb módja a karbontartalom, illetve az edződés szempontjából a karbonhoz hasonló hatást eredményező ötvözők, vagyis a karbonegyenérték mennyiségének csökkentése. Ez egyúttal az ausztenit stabilitását is csökkenti, így az M_s hőmérsékletet növeli, ami tovább csökkenti az edződési repedésképződés esélyét. Emellett fontos előírás lehet a hőhatásövezetben a megengedhető maximális HV_{max} keménység rögzítése. A karbonegyenérték és a karbontartalom függvényében az egyes acélokat hegeszthetőségük szempontjából három kategóriába lehet sorolni, ahogyan ez a 7. ábrán látható. Az I. kategóriába tartozó anyagok gyakorlatilag probléma mentesen hegeszthetőek, a II. kategória acéljai esetében már a vonalenergia alulról korlátozása szükséges, végül a III. kategória acéljai már csak limitált vonalenergiával és előmelegítés mellett hegeszthetőek. Jól látható hogy az általam vizsgált S690QL acélcsoport a III. csoportba esik.



7. ábra: Graville diagram – a karbonegyenérték és a karbontartalom repedésre gyakorolt hatása (Az egyes acélfajtákat jelölő szimbólumok a termékszabványok által megengedett összetételi maximumokat jelölik) [3]

A hidegrepedés kialakulásának kockázata csökkenthető előmelegítési technológia alkalmazásával. Az előmelegítés elve hogy a nagyobb hőmérséklet hatására csökken a kötés hűlési sebessége, továbbá mérséklődik a hőtágulás is, így az ebből származó feszültségek. Valamint javul a hidrogén diffúzió feltétele, aminek eredménye a lehűlt varrat diffúzióképes hidrogéntartalmának csökkenése.

A repedésképződés mérsékléséhez szükséges előmelegítési hőmérséklet meghatározásának alapja a karbonegyenérték kiszámítása, amelyre módszertől függően több összefüggés is szolgál. Ez az egyes ötvözők hatását veszi figyelembe a

repedésképződésben, a karbontartalomhoz viszonyítva. Az európai szabvány, és így a magyar szabvány is két számítási módot tartalmaz. Az MSZ EN 1011-2-es szabvány az IIW (International Institute of Welding – Nemzetközi Hegesztési Intézet) által ajánlott CE és az Uwer-Höhne módszerével kapható CET számításokat tartalmazza. Mindkettő ötvözetlen és kissé ötvözött acélok esetében alkalmazható, azonban a CET összefüggés már a nemesíthető, nagyszilárdságú, bórral ötvözött acélokkal végzett kísérletek adataira épül, így az általánosan vizsgált acélcsoport esetében ez alkalmazható a legbiztonságosabban.

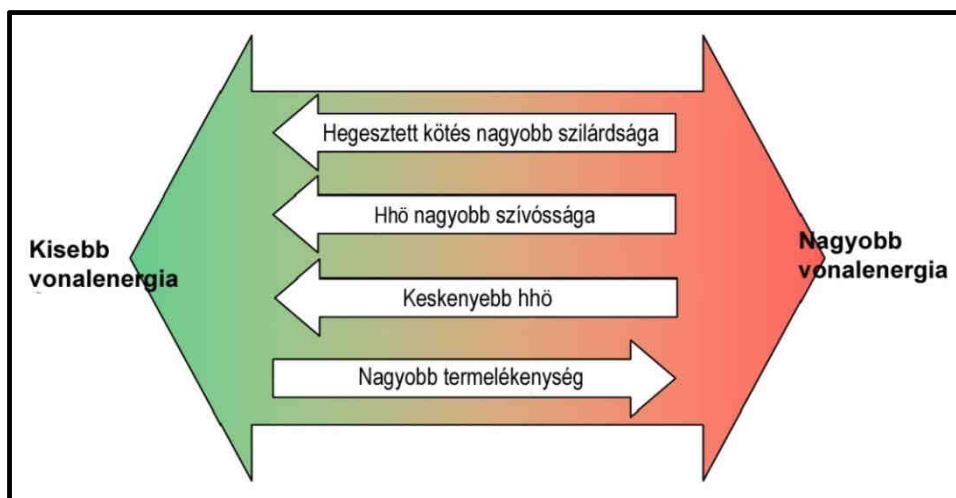
A vegyi összetételen kívül azonban más tényezőket is figyelembe kell venni a repedés elkerülés érdekében. Így a munkadarab vastagságát, a kötés kialakítását, a vonalenergiát és a diffúzióképes hidrogéntartalmat is. Az előmelegítési hőmérséklet meghatározása az MSZ EN 1011-2 szabvány szerint:

$$T_e = 697 \cdot CET + 160 \cdot \ln\left(\frac{s_m}{35}\right) + 62 \cdot H_d^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot E_v - 328 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Ahol: CET (%) a karbonegyenérték, s_m (mm) a kombinált vastagság, H_d (ml/100 g fém) a diffúzióképes hidrogéntartalom, E_v (kJ/mm) pedig a vonalenergia értéke [11].

Az előmelegítési hőmérséklet meghatározásának egyik fontos eleme a hegesztés során alkalmazott hőbevitel nagyságának ismerete. Hegesztés során a hőbevitelt a vonalenergiával szokás jellemezni. Ez definíció szerint nem más, mint a hegesztett kötés egy varratsorában elnyelt hőmennyiségnek és a hegesztett kötés hosszának a hányadosa. Maga a vonalenergia az egyik leggyakrabban használt, és az egyik legfontosabb jelzője a hegesztési folyamatnak. Pontos ismerete és szabályozása elengedhetetlen a megfelelő kötés létrehozásához. Általános szabály, hogy a vonalenergia növekedésével, a már korábban említett szemcsedurvulási hatás is növekszik. Ez növeli a veszélyét a ridegtörési hajlam, a rossz alakíthatóság kialakulásának, valamint a szilárdsági tulajdonságok romlásának [9].

Éppen ezért a nagyszilárdságú acélok hegesztése esetén nagyon fontos a vonalenergia kis értéken való tartása. Azonban ez kritikus esetben gyors hűlési sebességet okozhat, ami az edződési repedés kialakulása szempontjából veszélyes lehet. Ilyen esetben lehet előnyös az előmelegítési hőmérséklet növelése. A vonalenergia hatását a 8. ábra foglalja össze [6].



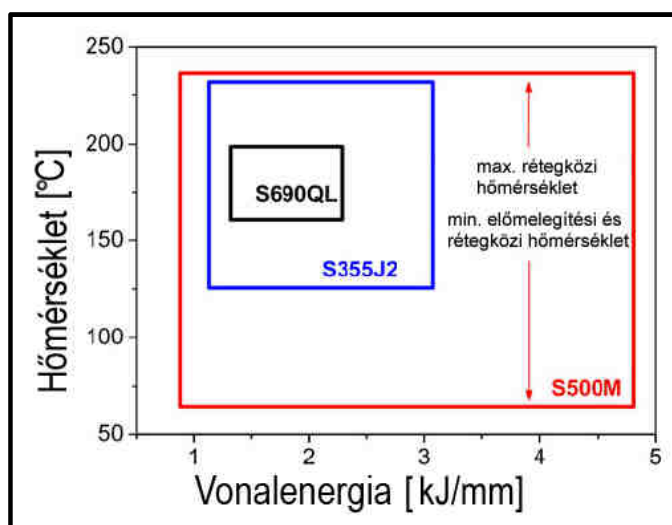
8. ábra: A vonalenergia hatása [6]

A vonalenergia és az előmelegítési hőmérséklet alsó határa a repedés elkerülés érdekében korlátozott, még a felső határértékek a szemcsedurvulás és ezzel együtt a szilárdsági tulajdonságok romlásának megakadályozására szolgálnak (9. ábra) [9].

Magát a vonalenergiát a mindennapi használat során a (2)-es képlet szerint lehet meghatározni. Ezt az összefüggést tartalmazza az MSZ EN 1011-1 szabvány is.

$$E_v = \frac{\eta \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi}{f \cdot v_h} \quad (2)$$

ahol: I (A) a hegesztőáram, U (V) az ívfeszültség, φ ($^\circ$) az áram és feszültség közötti fázisszög (egyenáram esetén ez 0), v_h (mm/s) a hegesztési sebesség, η a termikus hatásfok, f pedig a formatényező értéke.



9. ábra: Szerkezeti acélok munkatartománya [9]

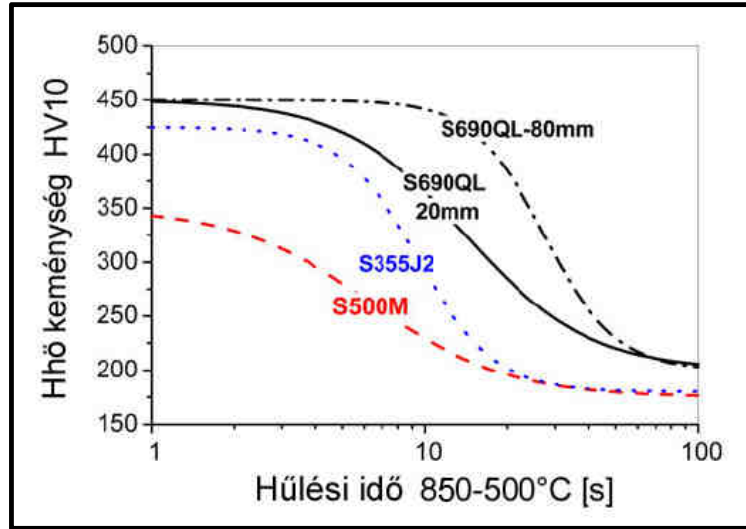
Az eddig bemutatott, a hegesztés végeredményét befolyásoló tényezők, mint az előmelegítés és a vonalenergia mellett legalább ilyen fontos és meghatározó az acél összetételétől függően a 850 °C-ról 500 °C-ra hűléshez szükséges idő. Ez a jellemző nagymértékben függ a vonalenergiától, ezen kívül hatással vannak rá a hegesztett kötés hővezető tulajdonságai is, mint a vastagság, hővezető tényező, illetve a kötésben résztvevő elemek száma. Ez a jelzőszám nem jelent mást, mint az A_3 hőmérsékletéről 500 °C-ra való lehűlés idejét. A nagyszilárdságú acéloknál az A_3 hőmérséklete 850-900 °C közé tehető, a karbontartalom függvényében.

Ez a paraméter szorosan összefügg a keletkezett szövetszerkezettel és így a hőhatásövezetben jelentkező keménységnagysággal is. Így nagymértékben meghatározza a kötés tulajdonságait is, lásd 10. ábra.

Ezen jól látható, hogy a hűlési idő növekedésével a hőhatásövezetben jelentkező keménység arányosan csökken. Ezen felül az is leolvasható, hogy egy adott hűlési idő esetén az S690QL nemesített, nagyszilárdságú acél hőhatásövezetének keménysége lényegesen nagyobb, mint például az S500M termomechanikusan kezelt acél esetében.

A hűlési sebesség és így a hűlési idő is nagymértékben függ a kötés kialakításától, a kötésben résztvevő elemek számától és méretétől is. Éppen ezért

beszélhetünk kétdimenziós (2D) és háromdimenziós (3D) hővezetésről is, vékony illetve vastag lemezek esetén.



10. ábra: A keménység és a hűlési idő kapcsolata [9]

A hűlési idő meghatározásának egyik lehetséges módszere Rosenthal elmélete [4, 12]. 2D-s esetben (3) a felületi hőátadás dominál, a hővezetés csak csekély jelentőségű. Ezzel szemben a vastag lemez esetén, vagyis 3D-s modellnél (4) a hővezetés a meghatározó, a felületi hőátadás pedig csak kisebb jelentőségű.

$$t_{8,5/5} (2D) = \frac{\Phi^2}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot v_h^2 \cdot s^2} \cdot \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(850 - T_0)^2} \right] \quad (3)$$

$$t_{8,5/5} (3D) = \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot v_h} \cdot \left[\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{850 - T_0} \right] \quad (4)$$

A számítások elvégzéséhez szükség van még egy adatra, a kritikus-, vagy határlemezvastagságra (5), amely megadja, hogy melyik modell érvényes a kettő közül. A képletekben szereplő jelöléseket az 1. táblázat tartalmazza.

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

Jelölés	λ	c_p	ρ	T_0
Megnevezés	hővezetési tényező	fajhő	sűrűség	előmelegítési hőmérséklet
Mértékegység	$\frac{W}{mm \cdot K}$	$\frac{J}{g \cdot K}$	$\frac{g}{mm^3}$	$^{\circ}C$
Jelölés	E_v	Φ	v_h	s
Megnevezés	vonal-energia	hő-áram	hegesztési sebesség	lemez-vastagság
Mértékegység	$\frac{kJ}{mm}$	W	$\frac{mm}{s}$	mm

1. táblázat: Alkalmazott jelölések a hűlési idő számításánál

A pontos hegesztéstechnológia megtervezésének fontos eleme a megfelelő hegesztő eljárás kiválasztása is, ezen keresztül pedig az alkalmazott hozaganyag megválasztása. Nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez leginkább a bevontelektródás kézi ívhhegesztést (ISO jele: 111), a védőgázos fogyóelektródás ívhegesztést (ISO: 131, 135) illetve a fedettívű hegesztést (ISO: 12X) alkalmazzák. A hozaganyag megválasztása nagyon fontos, hiszen ez határozza meg leginkább a kialakuló varratfém mechanikai tulajdonságait. Ennek megfelelően, vagyis a varratfém és az alapanyag mechanikai tulajdonságainak egymáshoz képesti viszonya alapján, beszélhetünk „**matching**”, „**overmatching**” és „**undermatching**” varratról.

Matching hozaganyagról akkor beszélhetünk, ha a keletkezett varratfém mechanikai tulajdonságai megegyeznek, vagy közel olyanok, mint az alapanyag mechanikai tulajdonságai. Undermatching esetén a varratfém mechanikai tulajdonságai elmaradnak az alapanyag tulajdonságaitól, még overmatching esetén a varrat tulajdonságai meghaladják az alapanyag mechanikai jellemzőit. Az összehasonlítás alapja a garantált minimális folyáshatár, illetve szakítószilárdság értékek, így természetesen egy konkrét anyag illetve hozaganyag esetén lehetnek eltérések ezektől az értékektől.

Általános elv, hogy a melegalakított acélok, mint a finomszemcsés acélok, esetén az alapanyaggal megegyező, esetleg kissé nagyobb szilárdságú, matching hozaganyagot használjunk, azonban nagyszilárdságú acélok esetén, amelyek folyáshatára nagyobb, mint körülbelül 600 MPa, már előnyösebb undermatching hozaganyagot választani, természetesen az így kapott kötés már lágyabb lesz, mint az alapanyag [9]. A kisebb szilárdság ellenére pozitív tulajdonság a varratfém nagyobb szívóssága, a hidrogén okozta repedéssel szembeni nagyobb ellenállás, illetve kisebb maradó feszültségek a hegesztett kötésben. Az említett előnyök mellett azonban érdemes megjegyezni, hogy rendkívül fontos az is, hol található a szerkezeten a hegesztett kötés. Azokon a helyeken ahol a kötés teljes egészében terhelve van, elengedhetetlen, hogy a kötés legalább olyan szilárdságú legyen, mint az alapanyag.

Azokon a helyeken azonban ahol a kötés csak kisebb feszültségnek van kitéve, már elegendő lehet kisebb szilárdságú varratot adó hozaganyagot alkalmazni. Ebből látható, hogy a megfelelő hozaganyag kiválasztásánál sok szempontot kell figyelembe venni. Az általam vizsgált, nemesített nagyszilárdságú, S690QL acél már abba a tartományba esik, ahol akár előnyös lehet a matching hozaganyag mellett undermatching elven hozaganyagot választani.

4. A HEGESZTÉSI KÍSÉRLETEK BEMUTATÁSA

Az S690QL jelű acélcsalád, amelyen keresztül vizsgáltam a vonalenergia szerepét, tehát a nemesített nagyszilárdságú acélok közé tartozik. Ezen acélokkal azonban hazánkban csak kevés vállalat foglalkozik. Az egyik kiemelkedő ilyen cég, amely felhasznál nagyszilárdságú acélokat a **RUUKKI Tisza Zrt**, amelynek telephelye Jászberényben található. A cégnek köszönhetem, hogy a kísérleteim létrejöhettek, hiszen ők biztosították mind az alapanyagot, mind a hegesztéshez szükséges berendezéseket, illetve hozaganyagot, valamint magára a kísérletekre is a cég gyártóüzemében került sor.

A kísérletek során két különböző hegesztett kötést készítettünk el. Mindkettő esetben a hegesztési pozíció, az alapanyag és a hegesztési eljárás is megegyezett. Nem volt eltérés a hozaganyagban és a védőgáz esetében sem. A paraméterek állandósága és reprodukálhatósága miatt mindkét kötést a cégnél alkalmazott hegesztőrobotok egyikén készítettük el. A két kísérlet közötti eltérést csupán a beállított paraméterek változtatása jelentette. Erre azért volt szükség, hogy képet kapjunk arról, hogy az S690QL acélok hegesztett kötései hogyan viselkednek a hegesztési paraméterek változtatása esetén, nevezetesen az optimálisnál nagyobb vonalenergia alkalmazása során. Ennek alapja az volt, hogy a nagyszilárdságú acélok esetében a paraméterek csak igen szűk tartományában érhető el megfelelő eredmény. Egy hegesztő részéről ez nagy odafigyelést igényel, ezért fontos, hogy megfelelő körülményekkel végezzék a munkájukat, az előírt paramétereket pedig mindig tartsák be. Egy üzemben azonban gyakran fordul elő olyan helyzet, hogy a hegesztő a termelés növelése, vagy egy közelgő határidő miatt kénytelen gyorsabban elvégezni az adott feladatot. Ez nyilvánvalóan figyelmetlenséghez, az előírt paraméterek be nem tartásához vezethet, ami nagyszilárdságú acél esetében a hegesztett kötés mechanikai tulajdonságainak drasztikus romlását eredményezheti.

Mivel a RUUKKI Tisza Zrt.-nél igen nagy mennyiségben alkalmaznak vastaglemezeket, ezért a kísérleteimhez a választott lemezvastagság 60 mm volt. A kísérletekhez aktív védőgázos fogyóelektródás ívhegesztést választottunk (ISO kód szerint: 135), mivel a nagyszilárdságú acéloknál igen fontos a szabályozott vonalenergia biztosítása, ugyanakkor a termelékenység is rendkívül meghatározó szempont. Ebből a megfontolásból a gyártók jelentős hányada, így a RUUKKI is, a 135-ös eljárást alkalmazza a nagyszilárdságú acélok esetén.

Már itt fontos megjegyezni, hogy az alkalmazott paraméterek (ívfeszültség, áramerősség, hegesztési sebesség) a robottal történő hegesztés során jellemzően a kézi hegesztés tartományában voltak, azonban a megfelelő varrat elkészítéséhez, a robot vezérléséből adódóan más paraméterpárosítások bizonyultak megfelelőnek. Általánosan elmondható, hogy a kézi hegesztéshez viszonyítva valamivel kisebb

feszültség és áramerősség értékek mellett értünk el ugyanakkora teljesítményt. Fontos megemlíteni, hogy gyakorlati szempontból a gyöksort kézi hegesztéssel célszerű elkészíteni. Ugyanis a gyök megfelelő minősége rendkívül fontos, robottal pedig sokkal nehezebben megoldható a lemez előkészítéséből adódó egyenetlenségek korrigálása, a megfelelő hegesztési sebesség aktuális beállítása. Ezeket a korrekciókat egy gyakorlott kézi hegesztő sokkal jobban le tudja követni. Mi azonban eltértünk ettől, és a gyöksort is a robot segítségével hegesztettük meg, abból a megfontolásból, hogy így minden réteg automatizált hegesztéssel készül el.

Vegyjel	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Al, %	B, %
alapanyag	0,17	0,21	1,0	0,008	0,001	0,093	0,0024
hozaganyag	0,07	0,76	1,67	0,005	0,011	< 0,01	-
Vegyjel	Cr, %	Cu, %	Mo, %	N, %	Nb, %	Ni, %	Ti, %
alapanyag	0,35	0,4	0,45	0,0038	0,3	0,04	0,06
hozaganyag	0,32	0,02	0,57	-	-	1,78	0,06

2. táblázat: ThyssenKrupp S690QL és Thyssen Union X85 hozaganyag vegyi összetétele

A vizsgált alapanyag és az alkalmazott hozaganyag vegyi összetételét és mechanikai tulajdonságait a 2. és 3. táblázatokban foglaltam össze, a bemutatott értékek a műbizonylatokon szereplő adatokat szemléltetik. A hozaganyag kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy S690QL acélcsalád esetén mind matching, mind undermatching hozaganyag alkalmazható, azonban a RUUKKI-nál jellemzően matching és overmatching hozaganyagokat használnak az egyes acélcsaládok esetében. S690QL acéloknál a legjellemzőbb a Thyssen Union X85-ös hozaganyag. Védőgázként mi az egyik legelterjedtebb keveréket használtuk, a **18 % CO₂-t és 82 % Ar-t** tartalmazó **Corgon 18-at**, ami az M21 csoportnak megfelelő.

Mech. jellemzők	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %	KV, J (-40 °C)
alapanyag	798	846	19	200
hozaganyag	≥ 790	≥ 880	≥ 16	≥ 47

3. táblázat: ThyssenKrupp S 690 QL és Thyssen Union X85 hozaganyag mechanikai tulajdonságai

A RUUKKI Tisza Zrt-nél két darab hegesztőrendszer üzemel. Mindkettő az IGM cég LIMAT RT 280-6 típusú gyártmánya. Magukat a robotokat pedig a magyarországi REKARD Győri Mezőgazdasági és Mechatronikai Gépgyárban állították elő. Mindkét robot védőgázos fogyóelektródás ívhegesztő eljárást használ,

más eljárásra nem alkalmasak, egy-egy Fronius Transarc 500 jelű áramforrással vannak felszerelve. A hegesztő robotrendszer a 11. ábrán látható. A rendszer több előre beprogramozható funkcióval is rendelkezik. Ilyen például az előre beállítható ívelés, amellyel a varrat alakja szabályozható, vagy az ívgyújtás beállítása, amely során különböző ívgyújtási módok közül választhatunk, illetve a robot addig ismétli ezeket, amíg nincs ív. Ezeken kívül lehetőség van a végkráter programozott feltöltésére a hegesztés végén, valamint impulzus üzemmód alkalmazására is, ebben az esetben azonban nincs lehetőség beállítani az alapáramot, a csúcsáramot valamint a frekvenciát sem, ez egy előre beállított program alapján történik (szinergia elv).



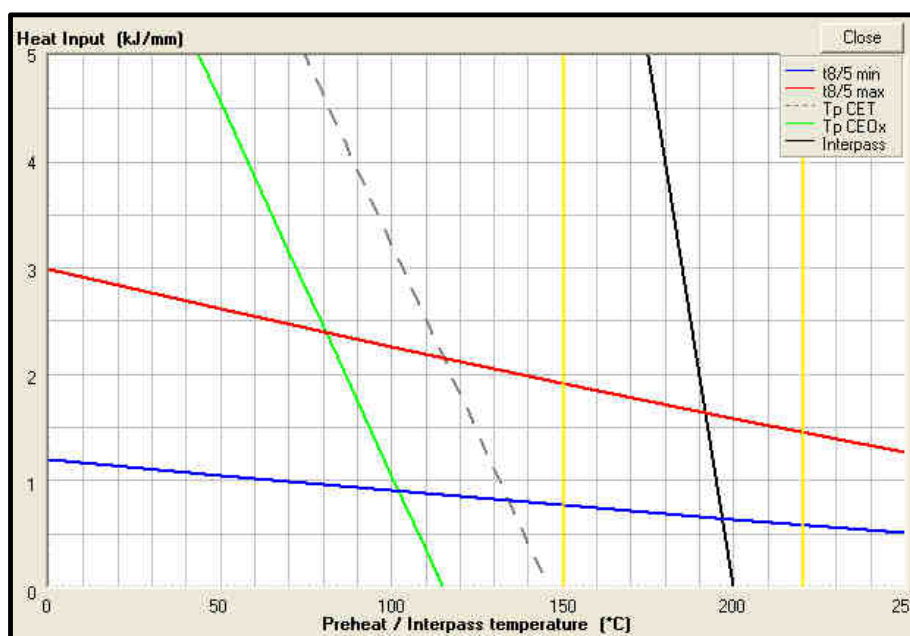
11. ábra: IGM LIMAT RT 280-6 robotrendszer

Az eddig bemutatott jellemzők mindkét kísérlet során megegyeztek, a további beállítások azonban már eltértek az egyes esetekben. Ide tartozik az előmelegítési hőmérséklet, valamint a rétegek közötti hőmérséklet meghatározása, továbbá a hegesztési sebesség, az áramerősség és a feszültség értékek megfelelő beállítása. Ez utóbbi paraméterek határozzák meg a vonalenergia értékét. A vonalenergia és előmelegítési/rétegek közötti hőmérséklet együttesen pedig a $t_{8,5/5}$ hűlési időt határozzák meg, így ezek megfelelő értéken tartása elengedhetetlen a megfelelő minőségű kötés kialakulása érdekében.

A hegesztés ezen paramétereinek meghatározásában legnagyobb segítségemre a SSAB Oxelösund cég által készített **WeldCalc** nevű program volt. A szoftverrel könnyen meghatározható mind az aktuálisan vizsgált anyag karbonegyenértéke, mind az előmelegítési és rétegek közötti hőmérséklet, valamint a hűlési idők is. Ezen kívül a program a bevitt adatok függvényében képes grafikusán megjeleníteni a hegesztési munkaterületet is, aminek segítségével könnyen meghatározhatóak az optimális hegesztési paraméterek (feszültség, áramerősség, hegesztési sebesség). Mivel a

nagyszilárdságú acélok esetében kell különleges figyelmet fordítani a bevitt hőmennyiségre, így a program kifejezetten ezen acélok esetén használható.

A program első lépésként a karbonegyenértékek meghatározását ajánlja fel, majd ezután a varratgeometriát lehet megadni. Miután a legfontosabb alapadatokat megadtuk, következő lépésként a program meghatározza a hegesztési munkatartományt. Ehhez következő lépésként be kell állítani az alapanyagra vonatkozó hűlési idő korlátokat. A szoftverben előre rögzített, a program gyártója által előállított, anyagok és a hozzájuk tartozó hűlési idők vannak megadva, ezek közül lehet kiválasztani a megfelelőt. Esetemben ez a Weldox 700-as anyag, amely megfelel az S690QL acélcsaládnak. Ezután a program a 12. ábrán látható módon megrajzolja a hegesztési munkatartományt. A vízszintes tengelyen az előmelegítési és rétegeközi hőmérséklet szerepel, még a függőleges tengelyen a vonalenergia. A piros, fekete, kék és zöld vonalak által közrezárt terület a munkatartomány, ahol a hegesztést kell végezni. Ez egy viszonylag szűk tartomány nagyszilárdságú acélok esetén, azonban a szilárdság csökkenésével, továbbá a lemezvastagság növelésével ez a terület szélesebbé válik.



12. ábra: S690QL jelű acél hegesztési tartománya

Abban az esetben, ha a hegesztési paraméterek a piros vonal, vagyis a maximális hűlési idő fölötti tartományba esnek, akkor a hőhatásövezet kilágyulásával, szívósságának csökkenésével kell számolni, még ha a kék vonal által jelzett minimális hűlési idő alá kerülnek a paraméterek átolvadási és kötéshibák hibák jelentkezhetnek. Ezzel szemben, ha az előmelegítési vagy rétegeközi hőmérséklet az ajánlottnál kisebb (zöld vonaltól balra) akkor megnő a hidrogénrepedés veszélye, még ha nagyobb (fekete vonaltól jobbra) akkor a hőhatásövezet mechanikai tulajdonságai csökkennek. Továbbá fontos megjegyezni, hogy a program két előmelegítési értéket is megad. Ezek közül a második, az ábrán a szaggatott vonallal jelzett, az MSZ EN 1011-2 szabványnak megfelelő, a gyakorlat szempontjából megalapozottabb.

Ennek megfelelően már rendelkezésre áll a minimális előmelegítési hőmérséklet és a maximális rétegeközi hőmérséklet. Azonban figyelembe kell venni,

hogy a megrendelők sokszor adnak meg gyártási és szállítási feltételeket. A Terex Demag gyártmányok esetében a hűlési idő megfelelő értéken való tartása érdekében a hegesztés közbeni hőmérséklettartományt előírták. Ennek megfelelően S 690 QL acélok esetén, 20 mm fölött 150 – 220 °C az előírt tartomány, ezt a 12. ábrán sárga függőleges vonalakkal ábrázoltam is [13]. Ennek a két feltételnek a figyelembevételével előmelegítési hőmérsékletnek 150 °C-ot, még maximális rétegeközi hőmérsékletnek 180 °C-ot írtam elő az első kísérlet alkalmával. A második kísérlet során azonban ezt az előírást szándékosan nem tartottuk be, előmelegítésnek 180 °C-ot választottam, még rétegeközi hőmérsékletre 250 °C-ot engedtem meg. A szállítási feltételekben előírt hőmérséklettartomány azonban nem az SSAB által javasolt hűlési időket veszi alapul. A Terex Demag feltételei sokkal szigorúbbak, náluk a megengedhető hűlési idő tartomány 6 – 15 s közé esik. A 12. ábra munkatartománya már ezt a szigorított feltételt veszi figyelembe, ugyanis lehetőség van a programban egyedi hűlési idő korlátokat megadni.

Végül a program segítségével a vonalenergiát és így a hűlési időt lehet meghatározni a feszültség, az áramerősség és a hegesztési sebesség megadásával a 13. ábrán látható módon. Ezzel az előírt hegesztési paramétereket lehet ellenőrizni, hogy azok a megfelelő hűlési idő tartományba esnek-e.

Recommended t8/5 interval		
	min	max
EUROX 355	2	80
WELDOX 420	3	60
WELDOX 460	3	60
WELDOX 500	3	60
WELDOX 700	5	25
WELDOX 900	5	20
WELDOX 960	5	15
WELDOX 1100	5	15

13. ábra: Hegesztési paraméterek ellenőrzése

Fontos azonban megjegyezni, hogy a program a 800 °C-ról 500 °C-ra való hűlés idejét számolja, nem pedig, a nagyszilárdságú acélok esetében sokkal megalapozottabb 850 °C-ról 500 °C-ra hűlés idejét. Ezt az eltérést a program használata során figyelembe vettem, a paraméterek ellenőrzése alkalmával.

Mielőtt ténylegesen elkezdtük volna a hegesztést, első lépésként elő kellett készíteni az összekötendő lemezeket. A vizsgált alapanyagból négy, egyenként 150 mm széles és 500 mm hosszú lemezt munkáltak ki, 30°-os leélezéssel. A kimunkálás lángvágással történt, ezt követően a leélezést marógépen alakították ki, végül a 3 mm széles élszalagot sarokcsiszoló segítségével készítették el. A kísérletek során ezekből készítettük el a két próbadarabot a lemezek megfelelő összeillesztésével. Mivel egyoldali varratot terveztünk, továbbá a lemezvastagság 60 mm, ezért számolni kellett bizonyos hőmérséklet okozta deformációval. Ennek elkerülése érdekében a

gyökoldalon merevítő lemezeket alkalmaztunk, továbbá bekezdő és kifutólemezeket is rögzítettünk. Ezek feladata volt a hegesztési rés állandó értéken tartása, ezt 3 mm-re vettem, továbbá az előhajlítás nagyságának megtartása, amit előzetesen 10° -ra állítottunk be az első kísérletnél, még a második esetében, figyelembe véve, hogy az 1. próbánál nem kaptunk teljesen sík lemezt a hegesztés végén, kisebbre, 8° -ra állítottunk be.



14. ábra: 1. hegesztési próba előkészítése

Az előmelegítési hőmérséklet az első kísérlet során 150°C volt. Mivel a próbadarab igen nagyméretű, így a hegesztés közben az alapanyagba jutó hő csak lassan tud távozni, így nagyon fontos a hegesztés közben a hőmérséklet folyamatos ellenőrzése annak érdekében, hogy a rétegek közötti hőmérséklet ne lépje túl a maximálisan előírt értéket. Jelen esetben ez 180°C volt, ellenőrzésre pedig termokrétát alkalmaztunk. A hőmérséklettel a hegesztés elején nem volt probléma, azonban miután az alapanyag felmelegedett, igen gyakran meg kellett állni annak érdekében, hogy a hőmérséklet visszacsökkenjen a megengedhető rétegek közötti hőmérséklet alá, ez nagymértékben megnövelte a kötés elkészítésének idejét. Abban az esetben, ha egy hegesztő kénytelen gyorsabban dolgozni, előfordulhat, hogy nem tartja be az előírt hőmérsékleti határokat. Ezt modelleztük azzal, hogy az előmelegítési hőmérsékletet megnöveltük 180°C -ra a második kísérlet alkalmával, valamint hegesztés közben a rétegek közötti hőmérséklet legfelső határának megjelölt 220°C -ot sem tartottuk be, amely a Terex Demag egyik gyártási előírása, hanem maximálisan 250°C -ot írtam elő. Ez érzékelhetően lerövidítette a kötés elkészítésének idejét, hiszen nem kellett megvárni, amíg az alapanyag 150 - 180°C -ig visszahűl.

A rétegek közötti hőmérséklet ellenőrzése robottal való hegesztés során még inkább előtérbe kerül, hiszen itt nincs szükség arra, hogy a hegesztő megpihenjen, a beprogramozott adatok alapján a robot képes folyamatosan hegeszteni. Éppen ezért az alapanyag hőmérséklete igen könnyen az előírt érték fölé kerülhet, így robottal való hegesztés esetén ez egy igen gyakori hibalehetőség. Ugyancsak problémás lehet a hegesztési paraméterek növelése, ami a leolvasztási teljesítmény növekedésében

jelentkezik, ebben az esetben kevesebb sorból, rövidebb idő alatt készül el a kötés. Éppen ezért ennél a kísérletnél ezeket a paramétereket is nagyobbra állítottuk be.

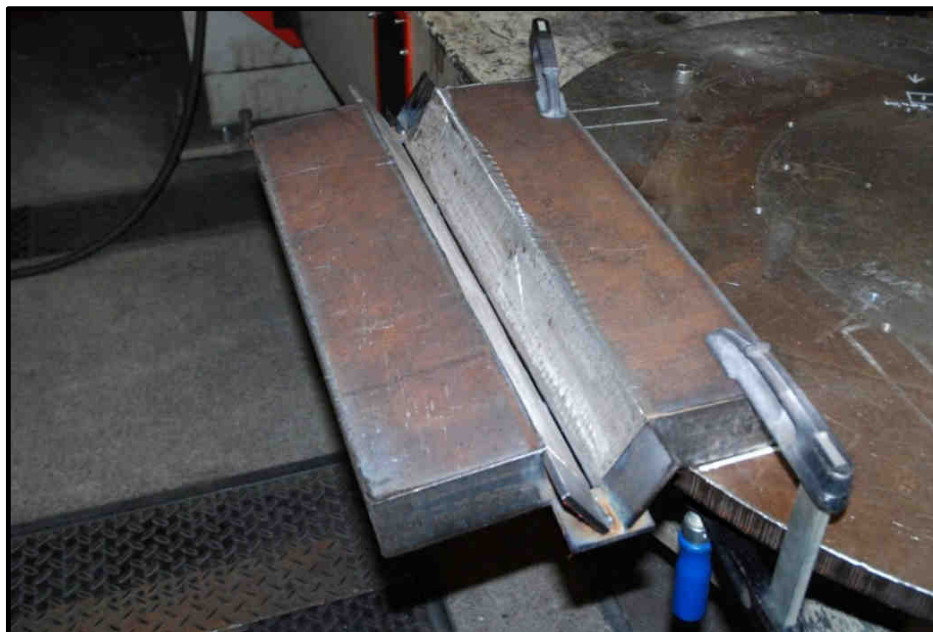
A hegesztés során a paramétereket folyamatosan rögzítettük és ellenőriztük is. Ehhez rendelkezésre állt egy folyamat felügyelő rendszer, WeldQAS, amelyet csatlakoztatva a hegesztő géphez, vagy robothoz képes minden hegesztési paramétert rögzíteni, amely nagy segítséget jelent mind a hegesztés felügyeletében, mind a későbbi kiértékelés szempontjából. Mindemellett a hűlési idők közvetlen mérésére is lehetőség volt, úgynevezett termoelemes mérőeszköz segítségével. Ezt a lehetőséget a kritikusnak számító gyök közelében, illetve a paraméterek állandósulásakor alkalmaztam, ellenőrizve a WeldCalc programmal kiszámított értékeket. Itt fontos megjegyezni, hogy a mérőeszköz is a 800 °C-ról 500 °C-ra való hűlés idejét méri, azonban a program eredményeivel ez jól összehasonlítható.



15. ábra: 1. hegesztési próba

Az adatok elemzésénél meg kell jegyezni hogy a hegesztőroboton nem lehet közvetlenül beállítani a hegesztési paramétereket, csupán a teljesítményt százalékos formában, ennek függvényében adódnak ki a táblázatban is látható értékek. A hűlési idő értékek az első kísérlet során az előírt 6 – 15 s-os intervallumon belül voltak a gyök kivételével minden sor esetében. Ennek oka, hogy a gyöksor hegesztése ezekkel a paraméterekkel tűnt a legmegbízhatóbbnak, nagyobb teljesítmény esetén már fennállt annak a veszélye, hogy a gyök átroskad. Így felvállaltuk annak esélyét, hogy a hűlési időket nem sikerül tartani, azonban a program által és más irodalmak által is ajánlott 5 s-os minimális hűlési időt sikerült betartani. Még az előző kísérletnél a vonalenergia nem haladta meg az 1,2 kJ/mm-t, addig a második esetében a jellemző értékek 1,2 és 1,6 közé estek. Ennek megfelelően a hűlési idő értékek is nagyobbra adódtak, az előírt 15 s-os maximális időt az első sorok kivételével szinte mindenhol túlléptük. A gyöksor esetében azért alkalmaztunk az első kísérlethez hasonló értékeket, hogy a gyök ne roskadjon át, ezért itt kisebb hűlés idők is adódtak. A további sorok esetében azonban az áramerősség és a feszültség értékek, és így a vonalenergia is viszonylag magasabb értékre adódtak, mégis a hűlés idők nem haladták meg a 18 s-ot. Ennek oka a lemezek

nagy vastagsága, ilyen esetben a vastag lemezekre jellemző 3D hővezetés miatt a hőelvonás az alapanyag felé igen jelentős, aminek a gyorsabb hűlés, vagyis kisebb hűlési idő az eredménye.



16. ábra: A 2. hegesztési próba előkészítése

A gyöksor hegesztése során ugyan a paraméterek miatti átrokadás nem következett be, azonban a robot függőleges vezérlésével akadt probléma az első kísérletnél, így a gyököt nem tudtuk megfelelő minőségűre készíteni. A második kísérlet esetében igyekeztünk ugyanazokat a paramétereket alkalmazni, azonban a lemezek élének előkészítése nem lett megfelelő a robot számára, így egyes helyeken átrokadás következett be, még máshol nem lett tökéletes az átolvadás. Éppen ezért gyökutánhegesztetésre volt szükség mindkét esetben. Így az eredeti terveknek megfelelően az egyoldali kötést nem tudtuk teljesíteni.

A kötések elkészítése során alkalmaztuk a hegesztőrobot egyik igen hasznos funkcióját, az impulzushegesztést. Mint már a robot leírásánál is említettem, itt nincs lehetőség az impulzus paramétereinek megadására, csupán a már említett hegesztési teljesítményt lehet megadni, a robot vezérlése ennek alapján határozza meg a szükséges értékeket. Ennek legnagyobb előnye, hogy a szabályozott cseppátmenet miatt csökkent a hegesztés közben a fröcskölés mennyisége, valamint mérséklődött a hőbevitel.

A 21. sortól minden további sor ugyanazon paraméterrel készült. Az egyedüli változást a hegesztési sebesség jelentette: a szélső sorokat 40 cm/min, még a belső sorokat 45 cm/min sebességgel hegesztettük az első kísérletnél, még a második próba során a szélső sorokat 35 cm/min, a belső sorokat pedig 45 cm/min sebességgel.



17. ábra: 2. hegesztési próba

A hegesztések során kapott paramétereket és a mért hűlési időket a 4. és 5. táblázatok tartalmazzák, még a kísérletek során készült felvételek a 14-17. ábrákon láthatóak. A kísérletekhez szükséges paramétereket az előzetes hegesztési utasítások tartalmazzák, ezek a mellékletben találhatóak.

Varratsor	Áram A	Feszültség V	Sebesség cm/min	Huzalelőtolás m/min	E_v , J/mm	Számított $t_{8/5}$, s	Mért $t_{8/5}$, s
Gyök	130	19,4	20	3,35	600	5	-
2.	188	23	35	5	600	5	5,9
3.	300	31	40	9,9	1200	9	-
4.	270	30	35	9,1	1100	9	-
5.	286	30,5	35	9,1	1200	10	9,5
6-7.	290	30,7	35	9,36	1200	10	-
8.	297	31	45	9,38	1000	9	-
9-17.	280	30,3	45	9,1	900	8	-
18.	280	30,3	60	9,1	800	7	-
19-20.	280	30,3	45	9,1	900	8	-
21-94.	290	30,7	40-45	9,36	1000-1100	9-10	10,9
Gyökután	275	30,6	35	9,18	1200	9	-
Megjegyzés: a 2.sor esetén az áramerősség oszlopban a csúcérték található, mivel itt impulzushegesztést alkalmaztunk							

4. táblázat: Hegesztési paraméterek az 1. kísérletnél

Varratsor	Áram A	Feszültség V	Sebesség cm/min	Huzalelőtolás m/min	E _v , J/mm	Számított t _{8/5} , s	Mért t _{8/5} , s
Gyök	130	19,4	20	3,35	700	6	-
2.	188	23	35	5,2	700	6	-
3.	311	30	40	8,91	1100	11	11,6
4-6.	325	30,25	35	8,92	1300	13	-
7-11.	329	30,4	45	9,1	1100	12	-
12.	332	30,6	35	9,2	1400	16	-
13.	339	31	35	9,32	1400	16	-
14.	360	32	45	9,4	1200	14	-
15-20.	367	32,35	35	9,4	1600	17	19,1
21-81.	363	32,1	35-45	9,2	1200-1600	15-18	-
Gyökután	340	31,25	32	9,3	1600	14	-
Megjegyzés: az áramerősség oszlopban a csúcserőértékek találhatók a gyöksor kivételével, ezen sorok esetében impulzus hegesztést alkalmaztunk							

5. táblázat: Hegesztési paraméterek a 2. kísérletnél

5. A HEGESZTÉSI KÍSÉRLETEK KIÉRTÉKELÉSE

Miután mindkét kísérletet végrehajtottuk a kötések minősítő anyagvizsgálatoknak vetettük alá az érvényben lévő szabvány, az MSZ EN ISO 15614-1:2004 szerint. A minősítéshez előírt roncsolásmentes vizsgálatok elvégzésére lehetőség volt közvetlenül a kötések elkészítése után a RUUKKI Tisza Zrt.-nél, az előírt 48 órás hevertetést követően, még a roncsolásos vizsgálatokat a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék anyagvizsgáló műhelyében hajtottuk végre.

Az első és második próba esetében a **roncsolásmentes** vizsgálatok során felületi hibákat, eltéréseket nem találtunk, azonban az ultrahangos vizsgálat során 6 – 10 mm mélyen a gyökoldalon, a hegesztett kötés szinte teljes hosszában kötéshibára utaló eltérést állapítottunk meg az első kísérletnél. A második próba során a hiba szintén megjelent, 6 – 10 mm mélyen a gyökoldalon, a hegesztett kötés középső harmadában.

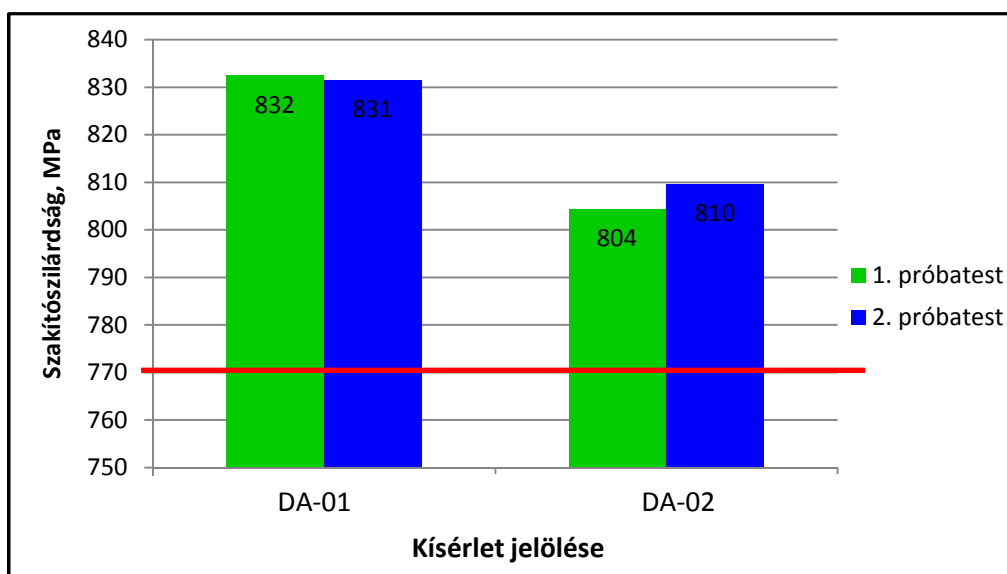
Próbatest jele	Szakítás előtt			Maximális terhelőerő kN	Szakító- szilárdság MPa	Szakadás helye
	szélesség	vastagság	keresztmetszet			
	mm	mm	mm ²			
DA-01/1	25,1	20,1	504,51	420	832	alapanyag
DA-01/2	24,9	19,9	495,51	412	831	alapanyag
DA-02/3	25,05	19,85	497,24	400	804	alapanyag
DA-02/4	24,96	20,09	501,45	406	810	alapanyag

6. táblázat: Keresztirányú szakítóvizsgálat eredményei

A **roncsolásos vizsgálatok** közül elsőként a **szakítóvizsgálat** során kapott eredményeket veszem sorra. A vizsgálatok során kapott eredményeket a 6. táblázat

tartalmazza, még ezek grafikus összehasonlítását az 1. diagram. Ebben feltüntettem az első és második kísérlet során készült kötésekől kimunkált 2-2 próbatest vizsgálatokor kapott értékeket, továbbá kiemeltem a minimálisan megengedhető szakítószilárdság értékét is S690QL acélok esetén, ami 770 MPa.

A diagramon jól látható hogy mindkét kötés teljesítette a szabvány által előírt minimális értéket. Azonban az is megfigyelhető, hogy a második kísérlet esetében a szilárdság jellemzően kisebb az első kísérlethez képest, ami megfelel az előzetes várakozásoknak. Ennél a kísérletnél alkalmaztunk ugyanis, az optimális esettől eltérően nagyobb vonalenergiát, valamint a rétegek közötti hőmérsékletet is magasabb értéken tartottuk. Mindkét érték növelése a szilárdság csökkenését eredményezi. Továbbá meg kell jegyezni, hogy mind a négy próbatest esetében a szakadás helye az alapanyag volt, ami egyértelműen az alkalmazott hozaganyagnak köszönhető.



1. diagram: Szakítóvizsgálatok eredményei

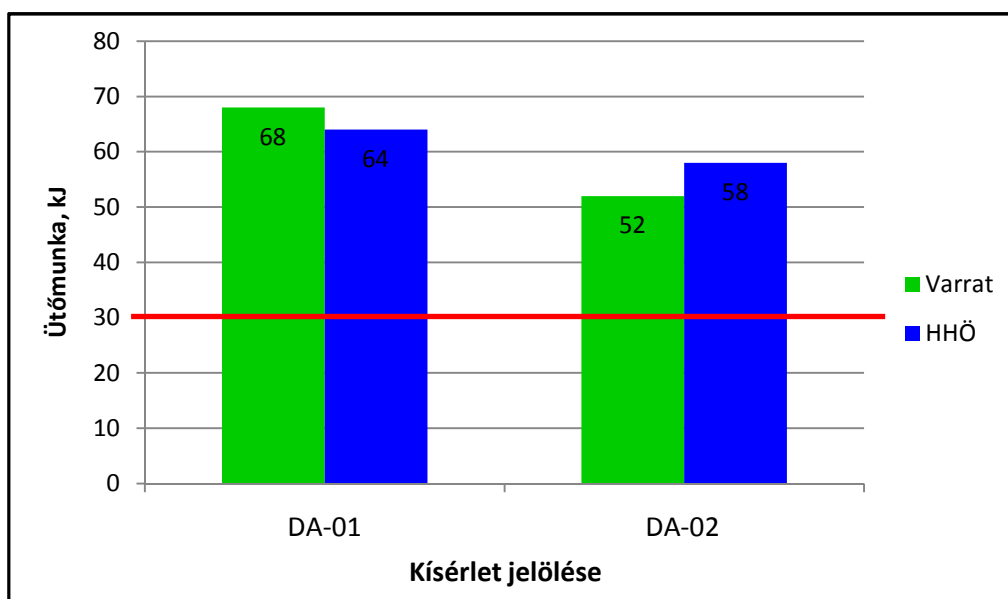
A **hajlító vizsgálat** során azt vizsgáljuk, hogy egy adott terhelő erő hatására, a hajlítási irány megváltoztatása nélkül a kötésből kimunkált próbatest egy adott hajlítási sugarat elvisel-e adott méretű repedés megjelenése nélkül. A vizsgálat akkor tekinthető elfogadhatónak, ha a hajlítás sugara eléri a 180° -ot. Ennek megfelelően az első kísérlet esetén 3, még a második kísérlet esetén 2 próbatest nem tudta teljesíteni a feltételt. Ennek oka a már említett gyökoldali kötésihiba, illetve az ebből kiinduló repedés, ezekben az esetekben a hajlítás sugara messze elmaradt a kívánt értéktől. Mivel azonban a kötésihiba mindkét hegesztés során jelentkezett, ezért ebből a szempontból a két kísérletet nem lehet összehasonlítani.

Az **ütővizsgálat** során kapott eredményeket a 7. táblázat tartalmazza, még ezek összehasonlítását a 2. diagram szemlélteti. Ezen külön feltüntettem a szabvány által előírt minimális ütemmunka átlagok értékét, ami S690QL acélok esetén, -40°C -on 30 J. Ennek megfelelően látható, hogy mindkét kísérleti kötés teljesítette az előírt feltételt, hiszen az ütemmunkák átlagértékei messze meghaladják az előírt 30 J-t. Továbbá egyik próbatest ütemmunka értéke sem volt kisebb ennél az értéknél, így elmondható hogy a kötések nagy biztonsággal megfeleltek.

Próbatest jele	Próbatest helye	Ütőmunka, KV, J	Átlagos ütőmunka, KV _{átlag} , J
DA-01/1	varrat	75,5	68
DA-01/2		73	
DA-01/3		56	
DA-01/4	hőhatásövezet	66	64
DA-01/5		65	
DA-01/6		60	
DA-02/1	varrat	52	52
DA-02/2		42	
DA-02/3		61	
DA-02/4	hőhatásövezet	53	58
DA-02/5		65	
DA-02/6		56	

7. táblázat: Az ütővizsgálat eredményei

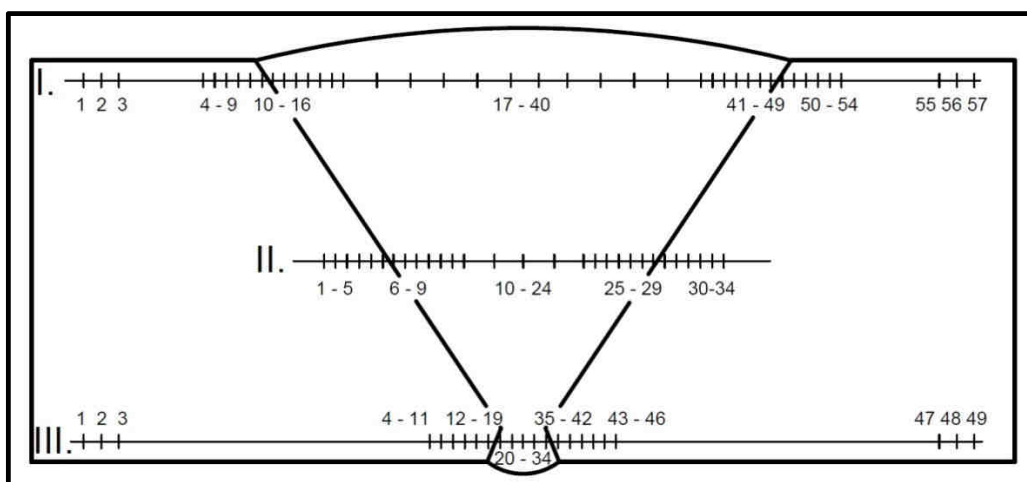
A szilárdsági tulajdonságokhoz hasonlóan az is megfigyelhető, hogy a szívósság a nagyobb vonalenergia és rétegekőzi hőmérséklet hatására csökkent. Ez a kedvezőtlen hatás a varratból kimunkált próbatestek ütőmunkája esetén nagyobb mértékű, még a hőhatásövezet esetében kisebb csökkenésről beszélhetünk, azonban a változás itt is egyértelmű. Azonban kijelenthető, hogy a jelen kísérletek során kapott szívósságcsökkenés ellenére az ütőmunka értékek jóval meghaladják a szabványban rögzített értéket. A szívóssági tulajdonságokban bekövetkező negatív változás a kísérletek során a növelt vonalenergia értékének és a rétegekőzi hőmérséklet viszonylag magas értéken való tartásának együttes következménye. Ugyanakkor ezt a negatív hatást az alkalmazott hozaganyag - Thyssen Union X85 - által biztosított szívóssági tulajdonság mérsékelni tudja.



2. diagram: Ütővizsgálatok eredményei

Mindkét kísérlet során az MSZ EN ISO 15614-1 szabványnak megfelelően végrehajtottuk a kötésekben kimunkált próbatesteken a **keménységmérési vizsgálatokat**. Ennek során keménységmérési sorozatot készítettünk mindkét próbatest korona- és gyökoldalán, valamint a kötés középső részében, a 18. ábrának megfelelően. Az így kapott eredményeket 3-5. diagramokon ábrázoltam. Mint már az előző fejezetben is látható volt, a szabvány maximálisan 450 HV keménység értéket enged meg az általam vizsgált anyagcsoport esetén, ezt mindkét kötés maradéktalanul teljesítette.

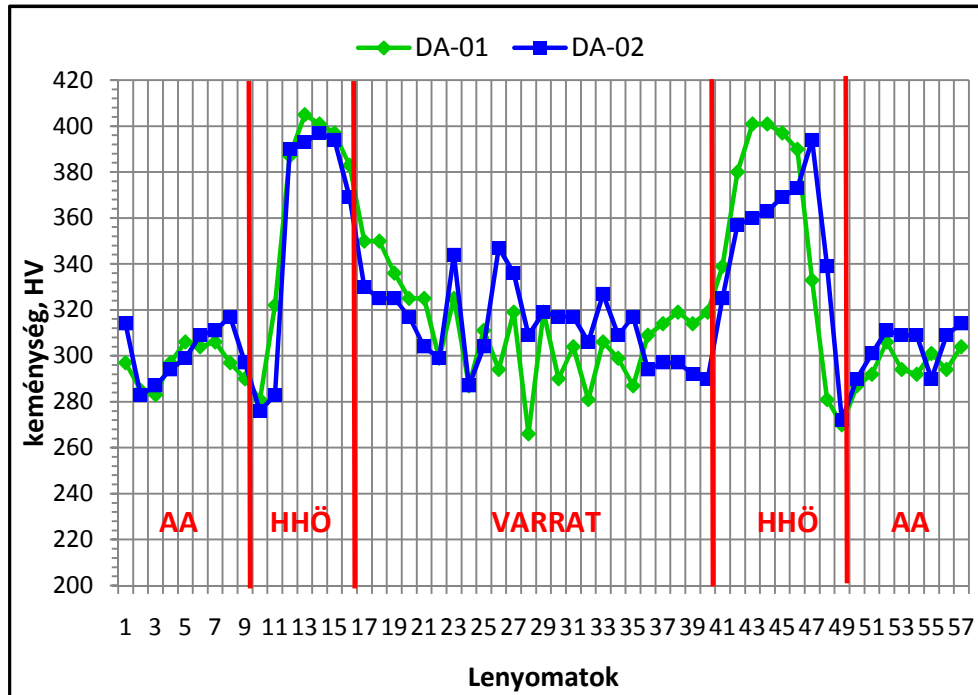
A diagramokon feltüntettem a keménység értékek mellett azt is, hogy melyik lenyomat a kötés melyik részéhez tartozik. Ennek megfelelően az alapanyag (AA), a hőhatásövezet (HHÖ) és a varrat (VARRAT) jól elkülöníthető egymástól. Megvizsgálva mindhárom diagramot azonban megállapítható, hogy az eredmények nem az eredetileg várt keménységeloszlást mutatják. A 6. ábra [10] alapján az S690-es acélcsoport esetében nem a keménységcsúcsok a meghatározóak, sokkal inkább a kilágyulás veszélye áll fent, még az ettől nagyobb szilárdságú acélok esetében, mint az S960 és S1100 kell számolni jelentős keménységnövekedéssel. Ezzel szemben az általam kapott eredmények egyértelműen a hőhatásövezetben bekövetkező nagymértékű felkeményedést mutatnak az összeolvadási vonalhoz közelebb eső részekben, valamint kismértékű kilágyulás figyelhető meg az alapanyag közelében.



18. ábra: Keménységlenyomatok elhelyezkedése

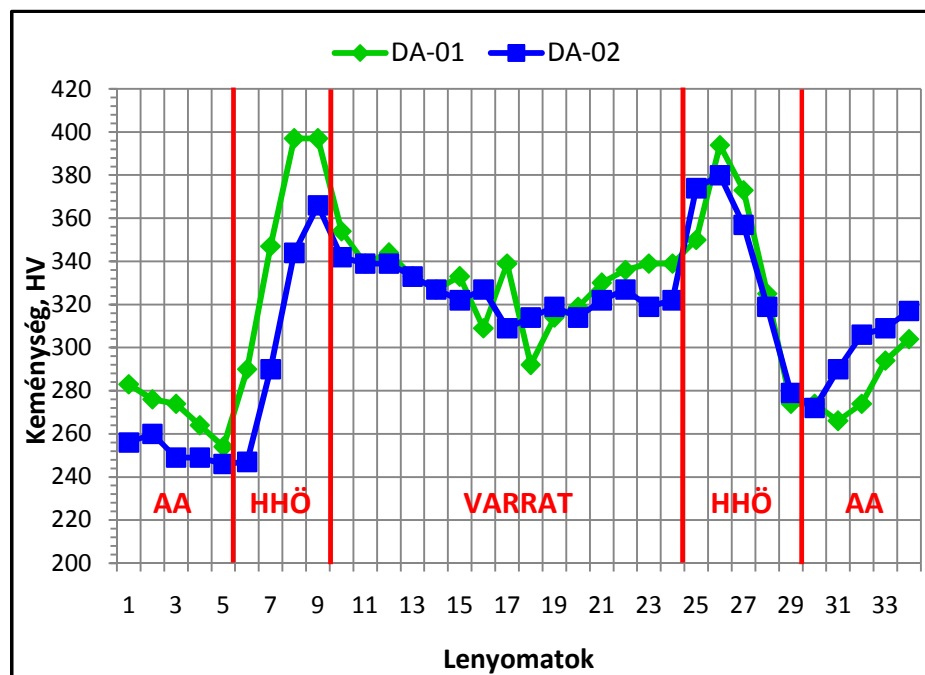
Megállapítható tehát, hogy a kísérletek során a nagyobb szilárdságú acélokra jellemző keménységnövekedés, valamint az S690 acélcsaládra jellemző kilágyulás együttesen jelentkezett a keménységeloszlás vizsgálata során.

Összehasonlítva a keménység értékeket a koronaoldalon megállapítható, hogy a második kísérlet során alkalmazott nagyobb vonalenergia, illetve rétegközi hőmérséklet ellenére nem jelentkezett meghatározó keménységcsökkenés az első kísérlethez képest. Azonban elmondható hogy a maximális keménység értéke az első kísérlet esetén 405 HV, még a második esetében 397 HV volt. Ugyanakkor az is látható, hogy a varrat keménysége közel azonos az alapanyag keménységével, aminek egyik magyarázata a matching hozaganyag alkalmazása. A varratban látható keménység értékek jelentős változásának az a magyarázata hogy az egymás után elkészített varratsorok hőhatásövezetei hatással voltak egymásra, így attól függően, hogy a keménységmérési helyek hova estek jelentős eltérések is kialakulhattak.



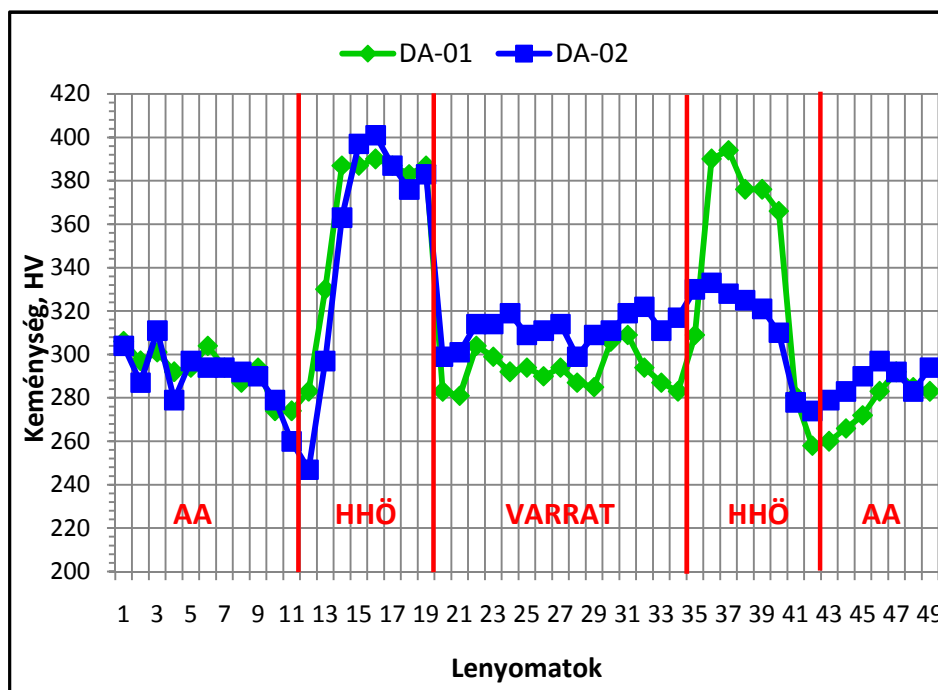
3. diagram: Keménységeloszlás a koronaoldalon

Összehasonlítva a kapott keménység értékeket a varrat középvezonájában látható, hogy a második próba során valamivel kisebb értékek adódtak, azonban az eltérés itt sem számottevő. A kisebb értékek egyértelműen a nagyobb vonalenergiának az eredményei. Ugyanakkor az alapanyag keménységéhez képest, ami átlagosan 300 HV volt, a varrat keménysége nagyobbra adódott, továbbá a keménység eloszlása is egyenletesebbre adódott, ami egyértelműen a következő sorok megeresztő hatásának tudható be.



4. diagram: Keménységeloszlás a kötés középvezonájában

Végül a gyökoldali keménységeloszlást megvizsgálva ugyancsak elmondható hogy nincs jelentős eltérés a két mérési sorozat között, ami viszont megfelel az elvárásoknak. Ugyanis a gyök esetében mindkét kísérlet során ugyanazokkal a paraméterekkel hegesztettünk. Az egyedüli különbség a nagyobb előmelegítési hőmérséklet volt, ami az eredmények alapján nem volt meghatározó ebből a szempontból. A legnagyobb különbség a második kísérlet esetében, a jobb oldali hőhatásövezet látványosan kisebb keménysége. Ez a annak köszönhető hogy a gyökutánhegesztés során nem lett teljesen szimmetrikus a varrat, így az egyik oldalon nagyobb volt a vonalenergia nagysága, ami jelentősebb kilágyulást okozott.



5. diagram: Keménységeloszlás a gyökoldalon

A **Makro- és mikrovizsgálat** során, az ultrahangos vizsgálat és a hajlító vizsgálat esetén már jelentkező, gyökoldali összeolvadási hiba szintén megjelent az első kísérlet esetében, a második kötésből kimunkált próbatesten azonban nem lehetett azonosítani. A makrovizsgálat során készült felvételek a mellékletben láthatóak.

Mivel a kötéshiba mindkét próba esetén megjelent különböző hosszúságban ezért valószínűsíthető, hogy annak oka mindkét esetben ugyanaz volt. Annál is inkább, mivel a gyöksort mindkét kísérlet esetében ugyanazokkal a paraméterekkel hegesztettük meg. Ugyanakkor a hűlési időket megvizsgálva feltételezhető, hogy a hiba kialakulásának nem a helytelenül megválasztott paraméterek a következményei. Mivel azonban mindkét esetben gyökutánhegesztést kellett alkalmazni - a kísérletek leírásánál már részletezett okok miatt - és a hiba is ennek környezetében található, ezért valószínűsíthető, hogy a gyökutánhegesztés előkészítése nem volt megfelelő, a hiba ennek következménye.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A dolgozatomban összefoglaltam, illetve összehasonlítottam a hegesztési kísérletek vizsgálatából származó legfontosabb eredményeket. Az ezekből származó következtetések és tapasztalatok a következőkben foglalhatóak össze:

- Az S690Q jelű acélsalád esetében megállapítható, hogy a hegesztési munkatartomány, vagyis a hegesztés szempontjából ideális munkaterület, összehasonlítva nagyobb szilárdságú acélok munkatartományával (pl.: S890, S960), nagyobb. Ez a 12. ábrának megfelelően azt jelenti, hogy ezek az acélok kevésbé érzékenyek a vonalenergia nagyságára, annak felső határértéke magasabb lehet.
- A kísérletek végrehajtása során bebizonyosodott, hogy az előre meghatározott hűlési idők csak becslésre alkalmazhatóak, azok nem adnak pontos értékeket. A kiszámított időket összevetve a ténylegesen kapott hűlési időkkel megállapítható, hogy a jelen kísérletek során a hűlési idő számítására szolgáló összefüggések igen jó közelítést adnak. Minden, ténylegesen megmért hűlési idő esetében 1-2 s-on belül volt az eltérés a számított értékekhez képest. Megállapítható továbbá, hogy a kisebb idők esetében kisebb volt a különbség is, a nagyobb hűlési időknél azonban az eltérés is megnőtt. Jelen kísérletek során a legnagyobb hűlési idő 20 s környékén alakult, azonban az adatokból egyértelműen látszik, hogy ennél nagyobb hűlési idő esetében a különbség a két érték között még tovább nőhet, vagyis a számítási képletek kisebb hűlési idők esetében megbízhatóbb értékeket adnak.
- Ahogyan a 4. fejezetben látható volt, mindkét kötés esetében, a gyökutánhegesztés ellenére, kötéshiba jelentkezett a gyökoldalon. Magára a gyökutánhegesztésre is azért volt szükség, mert a robottal nem tudtuk megfelelően elkészíteni a gyököt. Az ipari gyakorlattal ellentétben, ahol a gyököt kézi hegesztéssel készítik el, mi megpróbálkoztunk az első sort is robottal meghegeszteni. Az eredmények azonban egyértelműen mutatják, hogy kifogástalan gyök elkészítéséhez a kézi hegesztés a biztonságosabb megoldás, illetve automatizált hegesztés esetén elengedhetetlen a tökéletes élélőkészítés biztosítása, de legalábbis több kísérletre lehet szükség a hegesztő robot helyes beállításainak megtalálásához.
- A vizsgálatok eredményeit összehasonlítva megállapítható, hogy a vonalenergia, valamint az előmelegítési és rétegeközi hőmérséklet nagyságának növelésével mind a szilárdsági, mind a szívóssági tulajdonságok csökkennek. A szilárdsági jellemzők esetében jelentősebb volt a tulajdonságok romlása, azonban a szabvány előírását még így is teljesíteni tudta a kötés (1. diagram), valamint az összes szakító próbatest esetében az alapanyagban következett be a szakadás. A szívóssági tulajdonságok esetében már nem volt ilyen látványos az ütmunka értékek csökkenése, azonban a változás itt is egyértelműen megfigyelhető (3. diagram). Természetesen a kapott eredmények itt is kielégítik az előírásokat, illetve megfelelnek az előzetes elvárásoknak is, vagyis bebizonyosodott, hogy a nagyobb vonalenergia a tulajdonságok kedvezőtlen változását eredményezi.
- A keménységmérési vizsgálatok összehasonlítása alapján elmondható, hogy a nagyobb szilárdságú acélokra jellemző keménységnövekedés, valamint az S690 acélsaládra jellemző kilágyulás együttesen jelentkezett a kísérletek során (3-5.

diagramok). Továbbá megfigyelhető, hogy a második kísérlet esetében, a nagyobb vonalenergia ellenére sem következett be jelentős kilágyulás az első kísérlethez képest, sem a koronaoldalon, sem a varrat középvonalában, csupán minimális eltérés tapasztalható. Ez az alapanyag nagy vastagságából adódó intenzív hőelvonással magyarázható. Emellett a felsőbb sorok megeresztő hatása sem jelentkezett olyan mértékben, ahogy az várható volt, összehasonlítva azonban a korona- és a gyökoldalon mért keménységeloszlást, egyértelműen látszik a koronaoldal nagyobb keménysége.

- Összességében elmondható, de különösen az ütővizsgálat és a keménységmérés eredményein látszik, hogy a tulajdonságok romlása nem volt jelentős a második próba során sem. Ennek oka egyértelműen a vonalenergiával, illetve a robottal történő hegesztéssel magyarázható. Ugyanis automatizált hegesztés esetében, a robot vezérléséből adódóan illetve impulzushegesztés során, a paraméterek növelése mellett a vonalenergia nem változik olyan nagymértékben, mint kézi hegesztéskor. Ennek eredménye pedig a tulajdonságok kevésbé negatív változása. További következmény, hogy ezen acélok elviselnének még nagyobb vonalenergia alkalmazását is a kapott eredmények tükrében, hiszen a szabványok által előírt minimális értékeket a második próba kötései nagy biztonsággal tudták teljesíteni.
- Mindezekből az következik, hogy érdemes lenne ezen acélok robottal történő hegesztését további kísérleteknek alávetni, összevetni az eredményeket más acélok hegesztése során kapott adatokkal, különös tekintettel a termelékenység kérdésére. Már a mi kísérleteink során is bebizonyosodott, hogy robottal történő hegesztés esetén a hegesztési idő jelentősen csökkenthető a kézi hegesztéshez képest. Ebből a szempontból nagy jelentősége lehet a fedettívű hegesztés alkalmazásának ezen acélok esetén. A téma fontosságát mutatja, hogy az Air Liquide Welding cég már végzett kísérleteket nagyszilárdságú acélok fedettívű hegesztésére [14].

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Balogh A., Sárvári J., Schäffer J., Tisza M.:
Mechanikai Technológiák, Miskolci Egyetemi Kiadó, 2010.
- [2] Szunyogh L.:
Hegesztés és rokon technológiák, Gépipari Tudományos Egyesület, 2007.
- [3] Balogh A., Gáspár Marcell
Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója,
Hegesztéstechnika, 2012/3.
- [4] Gáspár M., Balogh A.:
Nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiájának fejlesztése a hűlési idő
elemzésével,
- [5] Tisza M.:
Metallográfia, Miskolci Egyetemi Kiadó, 2008.
- [6] Komócsin M.:
Nagyszilárdságú acélok és hegeszthetőségük, Hegesztéstechnika, 2002/1.
- [7] Komócsin M.:
Gépipari Anyagismeret, Miskolc, 2008.
- [8] Chung, J.; Kwon, O.:
Development of high performance auto steels at Posco steels Proc. of the 9th
ICTP Conference, Gyeongju-Korea, 7-11. September 2008.
- [9] Willms, R.:
High strength steel for steel constructions, Nordic Steel Construction Conference,
2009
- [10] Lagerqvist, O.; Clarin, M.; Gozzi, J.; Völling, B.; Oak, D.; Stötzl, J.; Lieurade,
H.-P.; Depale, B.; Huther, I.; Herion, 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
- [11] Kovács M.:
Áttekintés a hidrogén okozta repedésveszély elkerülésére alkalmazott
módszerekről, Hegesztéstechnika, 2003/4.
- [12] Görbe Z.:
Hőfizikai jellemzők hőmérsékletfüggésének hatása a hegesztési varratok
hűlési idejére, Hegesztéstechnika, 1993/3.
- [13] Ruukki Tisza Zrt.
Terex Demag gyártási és szállítási feltételek
- [14] Bauné, E.; Chovet, C.; Leduey, B.; Bonnet, C.; Starck, S.; Bertoni, A.:
Consumables for welding of (very) high strength steels – Mechanical properties
of weldments in as-welded and stress-relieved applications

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen dolgozat írója itt kíván köszönetet mondani mindazoknak, akik nélkül nem jöhetett volna létre ez munka. Köszönet illeti a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Mechanikai Technológiai Tanszékét, az oktatókat, a műhelyben és a laborban dolgozó szakembereket, mindazokat, akik segítségemre voltak munkám során. Külön köszönöm Gáspár Marcell Gyula konzulensként nyújtott segítségét, akihez mindig fordulhattam a témával kapcsolatos kérdéseimmel. Ezúton köszönöm meg tervezésvezetőmnek, Dr. Balogh András tanár úrnak az észrevételeit, amelyek hasznos információt jelentettek munkám során.

Köszönet illeti továbbá a RUUKKI Tisza ZRt.-t, akik betekintést engedtek a nagyszilárdságú acéltermékek gyártásába, az ott dolgozó hegesztési szakembereket, Sas Illés hegesztési felelőst, valamint külön köszönet illeti Dózsa Gábor hegesztő technológust, aki konzulensként fáradhatatlanul volt a segítségemre a kísérletek végrehajtása során. Itt köszönöm meg a RUUKKI-nak hogy biztosították a hegesztési kísérletekhez szükséges helyszínt, az alapanyagokat, a hozaganyagot valamint a hegesztő berendezéseket. Nélkülük a kísérletek nem jöhettek volna létre.

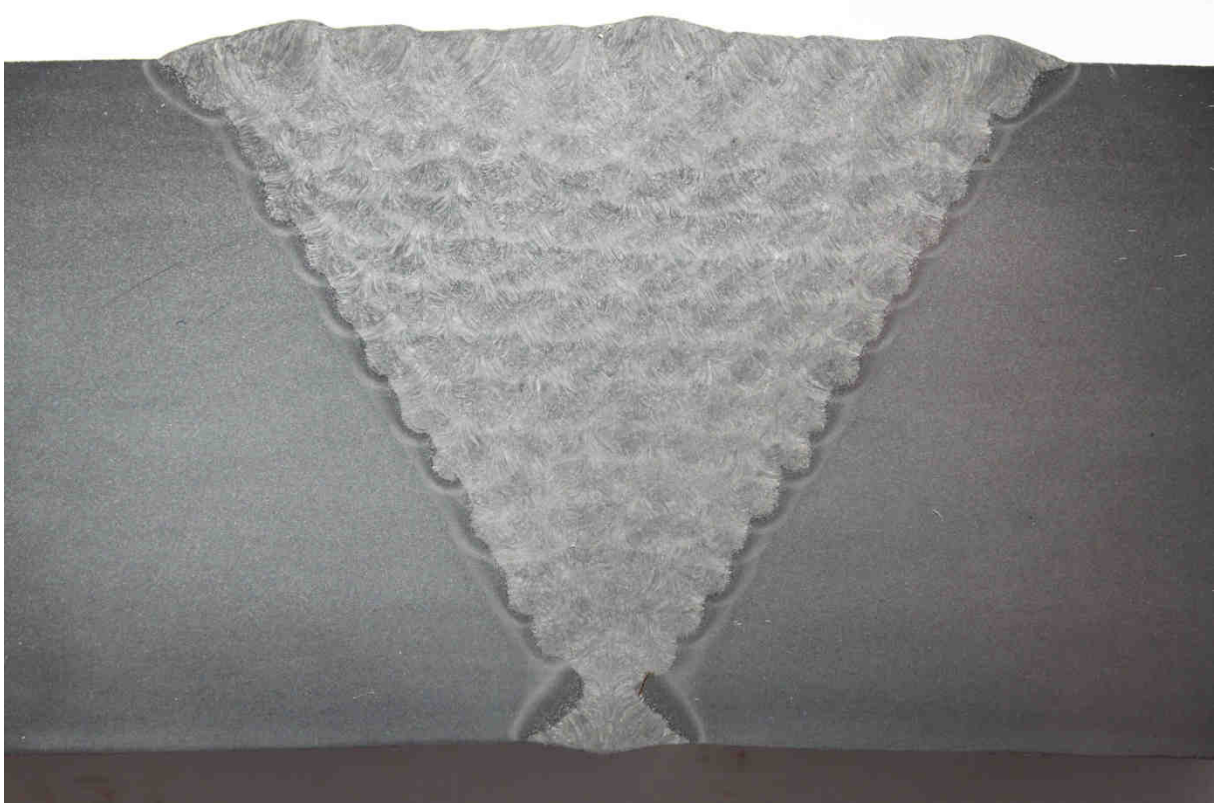
A tudományos diákköri dolgozat a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

MELLÉKLETEK

RUUKKI		PRELIMINARY WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)				pWPS no DA-01 Ref.: Date: 2012-08-29 Rev.: 0					
Prod. by: RUUKKI Tisza Zrt.		Client: Miskolci Egyetem		Ref. stand: EN ISO 15614-1							
Project: DA Diploma Thesis		Ref. spec.:		Exam. body:							
Location: Jászberény		Ref. WP:									
Welding process	135	2		3							
Shielding gas type	1 EN ISO 14175 - M21										
Weaving (yes/no)	No max.: mm		max.: mm			max.: mm					
Purging gas type	na	na	l/min								
Welding positions	PA										
Joint type	BW - tompavarrat										
Joint preparation	forgácsolás / machining										
Cleaning method	köszörüléssel / grinding										
Backing	No backing										
Single/Double	bs -kétoldali										
Back gouging	Gouging /C elektródával farag										
Flux designation	na										
Flux handling	na										
Tungsten electrode	na	mm									
Torch angle	na	°									
Stand off distance	na	mm									
Nozzle diameter(s)	na										
Tack welding proc.	Normál rögzítés	Rev.: 0									
Identification of parent metal I C max: 0,20 CE max: 0,77 PCM max: II C max: 0,20 CE max: 0,77 PCM max:											
	Name/Grade	Standard	Group	Delivery cond.	Thickness range (mm)	Diameter range (mm)					
I	S690QL	EN 10025-6	3		30,00 - 120,0	500,0 -					
II	S690QL	EN 10025-6	3		30,00 - 120,0	500,0 -					
Identification of filler metal											
Index	Trade name	Classification	Group	Filler handling							
1	Thyssen Union X85	G Mn4Ni1,5CrMo; EN ISO 16834-A									
2											
3											
Welding Parameters Equipment: IGM robot											
Pass no.	Index	Dia. [mm]	Welding process	Wire feed speed [m/min]	Current [A]	Volt [V]	Current / Polarity	Welding speed [mm/min]	Run Out Length [mm]	Gas [l/min]	Heat input [kJ/mm]
1		1,20	135	—	125 - 135	19 - 20	DC+	200 - 200	na	15-16	0,6 - 0,6
2		1,20	135	—	185 - 190	22 - 24	DC+	350 - 350	na	15-16	0,6 - 0,6
3-n		1,20	135	—	285 - 300	30 - 31	DC+	400 - 400	na	15-16	1,0 - 1,1
n+1		1,20	135	—	285 - 300	30 - 31	DC+	400 - 400	na	15-16	1,0 - 1,1
				—	—	—		—			—
				—	—	—		—			—
				—	—	—		—			—
				—	—	—		—			—
				—	—	—		—			—
Heat treatment Method:											
Preheat min: 150 °C Interpass temp. max: 180 °C Heat treatment proc.: gáz égovel Temp. control: Tempindic											
PWHT min: °C max.: °C Soaking: min/mm Heating rate: °C/h Cooling rate: °C/h											
Remarks: Hegesztés IGM robottal!								Additional info enclosed (Yes/No):			
Beállítandó paraméterek 30/20; 40/35; 70/40 (teljesítmény% / sebesség%)								Date/Signature: 2012-08-29 GDO			
A varratvályú feltöltése után átfordít, gyököt farag, majd hegeszt n+1-es sort!								Gábor Dózsa			
								Approved			

RUUKKI		PRELIMINARY WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)				pWPS no DA-02					
						Ref.:					
						Date: 2012-08-29 Rev.: 0					
Prod. by: RUUKKI		Client: Miskolci Egyetem		Ref. stand: EN ISO 15614-1							
Project: DA Diploma Thesis		Ref. spec.:		Exam. body:							
Location: Jászberény		Ref. WP:									
Welding process	135	2		3							
Shielding gas type	EN ISO 14175 - M21										
Weaving (yes/no)	No max.: mm		max.: mm		max.: mm						
Purging gas type	na - l/min										
Welding positions	PA										
Joint type	BW - tompavarrat										
Joint preparation	forgácsolás / machining										
Cleaning method	köszörüléssel / grinding										
Backing	No backing										
Single/Double	bs -kétoldali										
Back gouging	Gouging with C electrode										
Flux designation	na										
Flux handling	na										
Tungsten electrode	na mm										
Torch angle	na °										
Stand off distance	na mm										
Nozzle diameter(s)	na										
Tack welding proc.	Normál rögzítés Rev.: 0										
Identification of parent metal I C max: 0,20 CE max: 0,77 PCM max: II C max: 0,20 CE max: 0,77 PCM max:											
	Name/Grade	Standard	Group	Delivery cond.	Thickness range [mm]	Diameter range [mm]					
I	S690QL	EN 10025-6	3		30,00 - 120,0	500,0 -					
II	S690QL	EN 10025-6	3		30,00 - 120,0	500,0 -					
Identification of filler metal											
Index	Trade name	Classification	Group	Filler handling							
1	Thyssen Union X85	G Mn4Ni1,5CrMo, EN ISO 16834-A3									
2											
3											
Welding Parameters Equipment: IGM robot											
Pass no.	Index	Dia. [mm]	Welding process	Wire feed speed [m/min]	Current [A]	Volt [V]	Current / Polarity	Welding speed [mm/min]	Run Out Length [mm]	Gas [l/min]	Heat input [kJ/mm]
1		1,20	135	—	125 - 135	19 - 20	DC+	200 - 200	na	15-16	0,6 - 0,6
2		1,20	135	—	185 - 190	22 - 24	DC+	350 - 350	na	15-16	0,6 - 0,6
3-n		1,20	135	—	360 - 370	31 - 32	DC+	370 - 370	na	15-16	1,4 - 1,5
n+1		1,20	135	—	360 - 370	31 - 32	DC+	370 - 370	na	15-16	1,4 - 1,5
				—	—	—	—	—			—
				—	—	—	—	—			—
				—	—	—	—	—			—
				—	—	—	—	—			—
				—	—	—	—	—			—
Heat treatment Method:											
Preheat min: 180 °C		Interpass temp. max: 250 °C		Heat treatment proc.: Gáz égovel		Temp. control: Tempindic					
PWHT min: °C		max.: °C		Soaking: min/mm		Heating rate: °C/h		Cooling rate: °C/h			
Remarks: Hegesztés IGM robottal! Hegesztés 30/20; 40/35; 80/40 beállítással (teljesítmény% / sebesség%!) A varratvályú feltöltése után átfordít, gyököt farag, majd hegeszt n+1-es sort!								Additional info enclosed (Yes/No): Date/Signature: 2012-08-29 GDO Gábor Dózsa Approved			

Az 1. kísérlet makrocsiszolata



Az 2. kísérlet makrocsiszolata

