



MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a hőhatásövezetben bekövetkező mikroszerkezeti változások vizsgálata fizikai szimulációval

Baraté Boglárka
IV. éves gépészmérnök hallgató

Konzulensek:
Gáspár Marcell Gyula
PhD hallgató
Mechanikai Technológiai Tanszék
Dr. Balogh András
ny. egyetemi docens
Mechanikai Technológiai Tanszék

Miskolc, 2013

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	2
1. ALAPANYAG TULAJDONSÁGAI	3
1.1 Gyártástechnológiai folyamat	4
1.2 Hegeszthetőség.....	5
1.2.1 Hidegrepedés.....	5
1.2.2 Inhomogén hőhatásövezet	5
2. FIZIKAI SZIMULÁCIÓ - GLEEBLE 3500	7
2.1 Hőciklus modell.....	8
2.2 Rykalin-3D hőciklus modell elméleti háttere.....	8
2.2.1 Hőhatásövezetek.....	8
2.2.2 A hőterjedés	9
2.2.2.1 Hőterjedés szakaszi:	9
2.2.3 Hőforrás.....	9
2.2.3.1 A hegesztő ív:	9
2.2.3.2 A hőforrás teljesítménye és mozgási sebessége	10
2.3 Kísérleti paraméterek	10
2.4 Szimulációk végrehajtása	13
3. HŐHATÁSÖVEZETI ZÓNÁK TULAJDONSÁGAI	16
3.1 Részlegesen átkristályosodott zóna.....	17
3.2 Normalizált zóna	18
3.3 Szemcsedurvulási zóna	20

BEVEZETÉS

A nagyszilárdságú acélok felhasználása jelenleg a járműiparon belül két területen zajlik. A vékonylemezeket elsősorban személygépkocsi gyártás során, a közép- és vastaglemezeket az emelési és az anyagmozgatási iparágban, azon belül is földmunkagépek, mobil daruk alvázainak, illetve ezen járművekhez kapcsolódó kitámasztó házak és lábak alapanyagaként alkalmazzák. Egyre nagyobb mértékű hegesztett szerkezetben történő felhasználásuk miatt kellő figyelmet kell fordítani ezen acélok hegesztésekor a hőhatásövezetben létrejövő mikroszerkezeti tulajdonságok megismerésére, amelyek a hegesztés irreverzibilis jellegéből adódóan általában kedvezőtlenül hatnak az alapanyag tulajdonságaira.

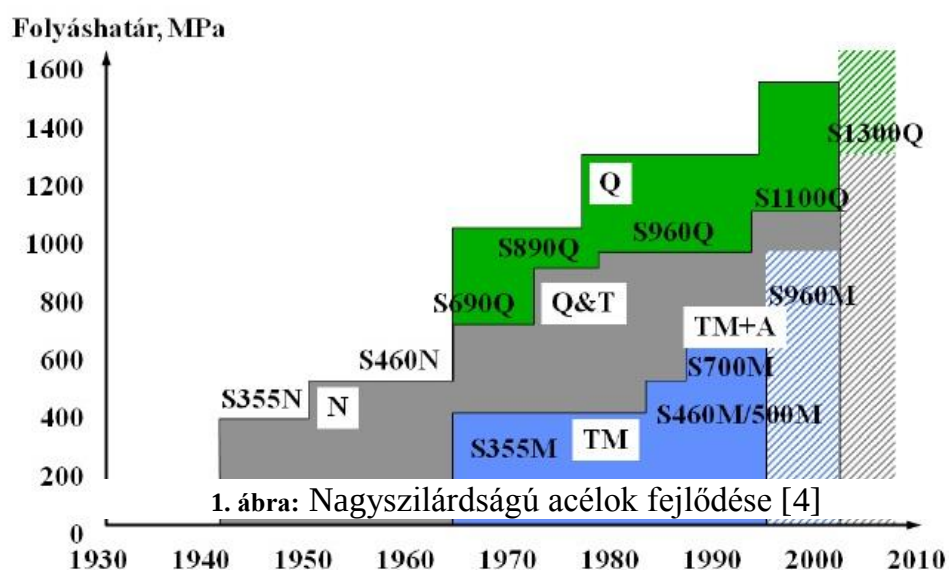
Jelen dolgozaton belül a nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a hegesztéstechnológiai paraméterek hőhatásövezetre, azon belül is három különböző hőhatásövezeti zóna szerkezeti tulajdonságaira gyakorolt hatásával foglalkozom. Egy valós hegesztett kötésben létrejövő különböző hőhatásövezeti zónák vizsgálata kiterjedésükből adódóan körülményesnek mondható, így korszerű vizsgálati módszer alkalmazása szükséges. A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén megtalálható GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor segítségével lehetőségünk nyílik a különböző hőhatásövezeti zónák létrehozására, és vizsgálatára.

A vizsgálat célja, hogy a nemesített nagyszilárdságú acélok 960 MPa folyáshatárú kategóriája esetén az optimálisnak feltételezett $t_{8,5/5}$ hűlési idő tartomány két határhőmérsékletére (5 és 15 s) előállítsuk a hőhatásövezet három jellemző zónáját, nevezetesen a szemcsedurvulási, normalizált és részleges átkristályosodási övezeteket. A szimuláció során kialakult szövetszerkezet tulajdonságainak feltérképezéséhez optikai mikroszkóppal készítettem felvételeket, illetve keménységmérés, valamint Charpy- féle ütésvizsgálat segítségével elemeztem a hegesztési paraméterek szövetszerkezetre gyakorolt hatását.

1. ALAPANYAG TULAJDONSÁGAI

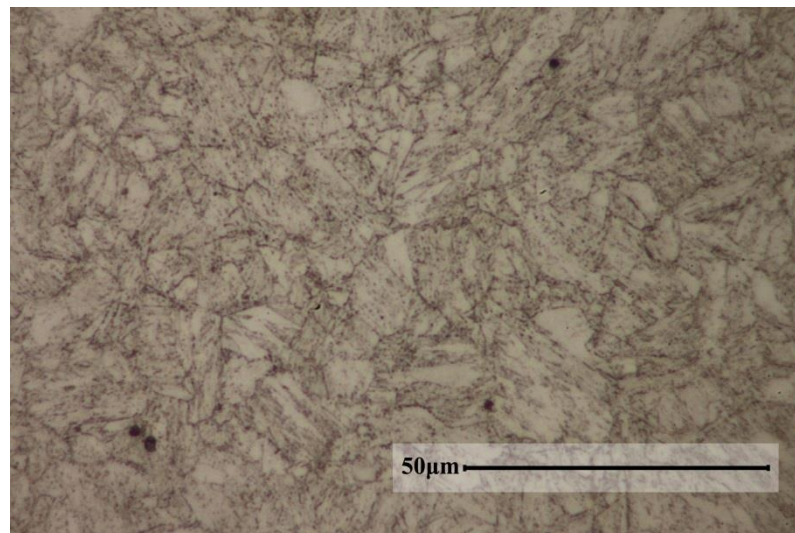
Az Európai Unió országaiban az MSZ EN 10025-6 szabvány nagyszilárdságú szerkezeti acélként tekinti a 460 és 960 MPa közötti folyáshatárral rendelkező acélokat. A hegesztett szerkezetben való felhasználásuk egyre nagyobb mértékű elterjedését elsősorban a kisebb szelvényméretekkel elérhető saját tömeg csökkentésnek köszönheti. A nagyobb folyáshatár kisebb teherviselő keresztmetszet alkalmazását teszi lehetővé, melynek következtében csökken a varrat a tömege, a hegesztési hozag-, és segédanyag mennyisége, illetve a hegesztési és előmelegítési munkaidő is.[3]

A hőkezelési eljárások közül szerkezeti acélok esetén a szilárdságnövelés eléréséhez általában négy eljárást alkalmaznak, név szerint: normalizálás, termomechanikus hőkezelés, kiválasztott keményítés és nemesítés. A nagyszilárdságú acélok csoportján belül a nemesített nagyszilárdságú acélok a legnagyobb folyáshatárral rendelkező szerkezeti acélok közé tartoznak. Jelen kísérlet során alapanyagként a nemesítéssel készült S960QL jelölésű csoportba tartozó, az SSAB által gyártott WELDOX 960 jelzésű acél szolgált. A jelölésben szereplő Q betűjel a gyors hűtésre, az L betű a szobahőmérséklet alatti üzemi hőmérsékletű berendezések (pl. mobil autódaruk) gyártásához való alkalmasságot jelenti.



1.1 Gyártástechnológiai folyamat

A nagyszilárdságú acélok kiemelkedő szilárdsági jellemzőit egy meleghengert követő nemesítésnek köszönhetik. Az A_3 feletti meleghengert és lassú szobahőmérsékletre történő visszahűtést egy A_3 hőmérséklet feletti edzés követ (angolul „quenching” rövidítve „Q”), mely során intenzív vízűtésűt alkalmaznak.[4] Az átedzhetőség javításának érdekében az átalakulási diagramokat jelentősen jobbra toló, a kritikus hűlési sebességet csökkentő ötvözőket, krómot és molibdént, esetenként nikkelt adagolnak a szilárdság növelésének és az edzés utáni ausztenit tartalom megtartásának érdekében. Az acélgyártó cégek által használt mikroötvözők közül a különösen erős karbidképző bórt érdemes külön kiemelni, melynek pontos mennyiségére kellő figyelmet kell fordítani. Abban az esetben, ha túl kevés, nem fejt ki hatását, azaz nem akadályozza meg a proeutektoidos ferrit kiválást, túlzott mértékű ötvözés esetén pedig segíti a ferritképződést, mely rontja az acél átedzhetőségét. Az ötvözőknek és a vízűtés hatásának köszönhetően a lemez teljes keresztmetszeten martenzites lesz. [5] Az edzés során létrejött finomszemcsés martenzitet a megszokottnál viszonylag rövidebb idejű A_1 hőmérséklet alatti megeresztés (angolul: „high temperature tempering”, rövidítve „HTT”) alkalmazásával részben megeresztene. A 2. ábrán látható így létrehozott nem-egyensúlyi megeresztett martenzites szövetszerkezet eredményezi a kimagasló szilárdsági és szívóssági jellemzőket. A keletkezett szövetszerkezet a hegesztés során végbemenő hőciklus következtében irreverzibilisen megváltozik, ezáltal a létrejövő hőhatásövezet meglehetősen inhomogén [4,8].



2. ábra: Alapanyag mikroszerkezete(N=1000x)

1.2 Hegeszthetőség

A közepes vastagságú nagyszilárdságú acélokat elsősorban emelési és anyagmozgatási szerkezetek alapanyagaként használják fel, ezért kiemelten fontos, hogy hegeszthetőség szempontjából megfeleljenek. Felhasználásuk során a hegesztési hőciklus hatására létrejött inhomogén hőhatásövezetből adódó hidegrepedések megjelenése, illetve kilágyulás okozhat problémát.

1.2.1 Hidegrepedés

Hidegrepedések oka, hogy a kis alakváltozó képességű anyag nem képes megállítani a diffúzióképes hidrogén tartalom miatt képződő mikrorepedéseket, melyek terjedését a hegesztés során létrejövő húzófeszültségek „táplálják”.

A hegfürdőben ragadt hidrogén atomok a nagyobb rácshézagokban összegyűlve hidrogén molekulává alakulnak át, melyek méretüknél fogva akadályozzák a diszlokációk mozgását, azaz ridegtik az anyagot, ill. a hidrogéngáz megnövekedett nyomása repedést okozhat [7]. A hidrogén jelenléte megfelelő hozaganyag és védőgáz alkalmazásával, valamint a hegesztési felületek tisztításával csökkenthető. A repedés terjedéshez szükséges hőtágulásból adódó gátolt alakváltozás miatt kialakult húzófeszültség értéke helyesen megválasztott paraméterek, valamint előmelegítés alkalmazásával mérsékelhető.

1.2.2 Inhomogén hőhatásövezet

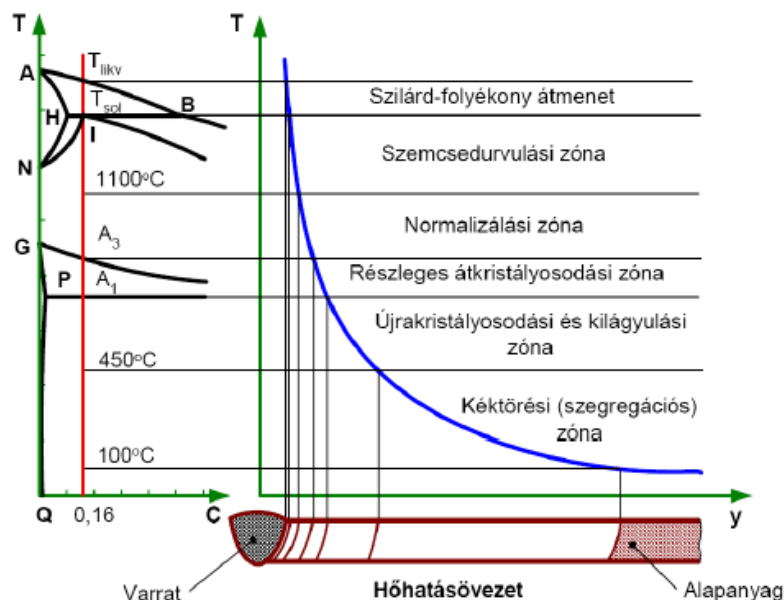
A hegesztési folyamat során létrejövő hőciklus a gyártás során létrehozott nem-egyensúlyi szövetszerkezetet irreverzibilisen megváltoztatja, valamint a nagy hőmérséklet gradiens miatt, a hőhatásövezet zónái különböző tulajdonságokkal bírnak, ezért kimagasló figyelmet kell fordítanunk a technológiai paraméterek megfelelő megválasztására, valamint azok hőhatásövezetre kifejtett hatására. Az alapanyag szilárdsági tulajdonságainak megőrzése érdekében az optimális technológiai paraméterek szűk határon belül helyezkednek el (a hegesztéstechnológiai paraméterablak más néven „welding lobe” kis területtel rendelkezik) illetve gondos figyelmet követel a kiválasztott értékek megtartása és reprodukálása. A varrat és a hőhatásövezet kilágyulásának és szívósság csökkenésének megakadályozása érdekében hegesztés során a lengetés elkerülésére kell törekedni [8].

Nagyszilárdságú acélok hegesztésekor két kedvezőtlen zóna megjelenésére kell számítani a hőhatásövezetben. Az egyik a varrathoz közel eső felkeményedett, rideg övezet, melynek szövetszerkezete többnyire tús martenzites, ritkán megeresztett martenzitet, olykor bainitet tartalmaz. A hőhatásövezet ezen részének keménysége 400 HV feletti értéket is elérhet, és megközelítheti az MSZ EN ISO 15614-1 szabvány szerinti 3. anyagcsoportra maximálisan megengedett 450 HV értéket. Ennek a nagy keménység értéknek és a durvaszemcsés

szerkezet együttesének eredménye az alapanyagéhoz képest csökkent szívóssági jellemzők [8].

A másik kedvezőtlen zóna a beolvadási vonaltól viszonylag távol létrejövő részleges átkristályosodási zóna, melynek szilárdsága elmarad az alapanyag keménységétől. Egy korábbi, valós hegesztett kötással készült kísérlet mikroszkópi felvételein a hőhatásövezet alapanyaghoz közelebb eső részétől a normalizált övezet felé haladva egyre növekvő mennyiségben figyelhető meg, hogy a hőciklus hatására létrejött ausztenites állapotú részek a lehűlésük során bainitké és/vagy martenzitké alakultak át, miközben a körülöttük lévő eredeti szövet a hőciklus hatására megeresztődött, és kilágylt [8].

A két zóna között egy nagyon finomszemcsés megeresztett martenziből és bainitból álló, az alapanyaghoz hasonló szilárdsággal rendelkező normalizált övezet helyezkedik el, mely kiváló szívóssággal rendelkezik. A kísérlet céljaként ezen három hőhatásövezeti zóna előállítását tűztem ki célul [8].



3. ábra: Hegesztett kötés hőhatásövezeti zónái [2]

2. FIZIKAI SZIMULÁCIÓ - GLEEBLE 3500

Az első fizikai szimulációs rendszerek felhasználása a XX. század közepén kezdődött meg a fémiparban, elsősorban az USA, a Szovjetunió és Kína kutatóintézeteiben, majd a későbbi évek során kereskedelmi forgalomban is megjelentek az úgynevezett GLEEBLE fizikai szimulátorok. A fizikai szimuláció lényege, hogy a valós gyártási folyamat alatt az anyagra ható termikus és mechanikai hatások laboratóriumi körülmények között pontosan reprodukálhatóvá válnak úgy, hogy a kapott eredményeket egy későbbi, valós probléma esetén használjuk fel. Mindezeket összefoglalva a fizikai szimuláció egy lehetséges definíciója: „A fizikai szimuláció nem más, mint a tényleges és a lehetséges ipari folyamatok megvalósítása, a valósággal egyező időléptékben és a valóságot jól megközelítő geometriai (térfogati) léptékben [9].

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén megtalálható, a DSI (Dynamic System, Inc.) által gyártott harmadik generációs GLEEBLE 3500 teljes körűen integrált, digitálisan zártkörűen vezérelt termo-mechanikai rendszer közvetlen ellenálláshevíítő rendszere különböző sebességgel képes felhevíteni a próbatestet, a hevítési sebesség akár a 10 000 °C/s-ot is elérheti, illetve ugyanekkora hűtési sebesség is megvalósítható a nagy hővezető képességű befogók és a megfelelő edzési opció vizsgálati összeállításának együttes hatásával. A fizikai szimulátor által megvalósítható folyamatszimulációk közül a hőhatásövezeti teszt (HAZ test) alkalmazásával és a hegesztéstechnológiai paraméterek (hűlési idő, előmelegítési hőmérséklet, stb.) megfelelő beállításával, a generált hőciklus hatására a vizsgálni kívánt zóna szövetszerkezete a próbatest teljes keresztmetszetében viszonylag nagy térfogaton létrehozható, mely egy valós hegesztett kötésben a hőhatásövezeti zónák csekély kiterjedése miatt nehezen lenne vizsgálható.[9]

2.1 Hőciklus modell

A hőciklus generáláshoz 6 féle beállítási mód, illetve hőciklus modell áll rendelkezésre [9].

- Táblázatos forma: $F(s,d)$ mérési eredmények megadása (tényleges hegesztett kötésen termoelemmel rögzített hőciklusok felhasználásával)
- Hannerz egyenlet
- Rykalin-2D
- Rykalin-3D
- Rosenthal egyenlet
- Exponenciális hűtés

Amelyek közül a vastagabb lemezekre érvényes Rykalin-3D modell alkalmazása mellett döntöttem. A modell választását indokolja, hogy a vékonylemezekre vonatkozó Rykalin-2D modellel szemben a 3D modell független a lemezvastagságtól, ezáltal az eredmények értékelését kevesebb változó nehezíti.

2.2 Rykalin-3D hőciklus modell elméleti háttere

A fémekben végbemenő hőterjedési folyamatok elméletének kidolgozása a hőforrások sajátosságai alapján történt. Mint minden hőbevitel esetén, ezáltal hegesztés során is a hővezetés több tényező függvényében következik be. Hegesztés során a hőforrások (gázláng, hegesztőív) által bevitt hő az alapanyag felületének egy kis részét érinti, a fémen a hővezetés folyamán terjed szét, mely függ a hőforrás alkalmazásának jellegétől, a fém hővezetőképességétől, valamint a fémfelület és a környezet hőcseréjétől.

2.2.1 Hőhatásövezetek

Ívhegesztésnél a hegesztendő munkadarabban végbemenő hőterjedés során a hőhatásövezet kiterjedését a hőforrás közelében a hőforrás mozgása és a munkadarabban lévő hőáramlás eloszlása határozza meg, míg a hőforrástól távolabb elhelyezkedő hőzónák a hegesztett szerkezet alakjától és méretétől függenek. Az általunk választott vastagabb lemezekhez alkalmazott Rykalin-3D modell egy háromdimenziós hőterjedési folyamatot hoz létre, mely során egy félig-végtelen test felületén a hőmérsékletmezőt egy mozgó pontszerű hőforrás hozza létre. A hővezető test a hőforrás érintkezési pontjánál létrejövő nagy hőkoncentráció miatt határtalannak tekinthető.

2.2.2 A hőterjedés

Hőterjedés során a határfelületek a hő számára áthatolhatatlanak, vagy a környezetnek adják le azt. Hegesztés során a hőterjedési folyamatok a fém forrpontjához közel eső illetve a környező közeg hőmérséklete között folynak le. A valóságban a fém hőfizikai jellemzői (pl.: fajhő, hővezetési tényező) és a felületi hőátadási tényező a hőmérséklet függvényei, az elmélet megalkotása során azonban állandónak tételezzük fel ezen értékeket, valamint a fázis- és szövetátalakulások hőhatásait figyelmen kívül hagyjuk[12] .

2.2.2.1 Hőterjedés szakaszi:

A hőterjedési folyamatában ívhegesztés során három időszak különböztethető meg:

- 1) Hőtelítődési időszak: a hőmérséklet tovább nő a hőforrással együtt mozgó mezőben.
- 2) Határértéket jellemző kvázistacionér állapot: az állandó sebességgel mozgó, állandó teljesítményű hőforrással együtt mozgó mező, a hőforrás hatása után megállapodik.
- 3) Hőmérséklet kiegyenlítődése: azon pontok, melyek hőmérséklete megközelítette a hőterjedés határértékét a hőforrás megszűnése után gyorsan hűlni kezdenek, míg azon pontok hőmérséklete, melyekre a hőforrás hője nem volt hatással a hőkiegyenlítődése hatására növekednek.

2.2.3 Hőforrás

2.2.3.1 A hegesztő ív:

Mint korábban is említettem, a hegesztőív közvetlenül a munkadarab egy kis felületével érintkezik. Abban az esetben, ha a modell elméletének kidolgozása során figyelembe vesszük a munkadarab felületén az ív hőeloszlását illetve az ívfolt véges méreteit a hőmérséklet eloszlásában csupán közvetlenül az ívvel határos övezetben történik változás, mely hatással van a hőhatásövezet alakjára, méretére, szövetszerkezetére valamint a beolvadási alakra. Az ív hőmérséklet-eloszlásának hatása a hőforrástól távolodva kevésbé érzékelhető. Ennek okaként a számítás során az ív hőmérséklet eloszlását figyelmen kívül hagyták és a hegesztő ívre egy állandó E_v J/mm teljesítményű összpontosított hőforrásként tekintenek, mely egy v mm/s állandó sebességgel egyenletesen és egyenes vonalúan mozog. Ezáltal a hőforrással együttmozgó koordinátákra vonatkozó összefüggés a következőképpen írható le:

$$T(R, x) = \frac{E_v}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(x+R)} \quad (1)$$

Ahol,

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad \text{a helyvektor}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \quad \text{a hőmérsékletvezetési tényező, m}^2/\text{s}$$

E_v , vonal energia, J/cm

λ , hővezetési tényező, W/mK

c_p , fajhő, J/g/°C

ρ , sűrűség, g/cm³

v , hegesztési sebesség

2.2.3.2 A hőforrás teljesítménye és mozgási sebessége

A hőmérséklet változása a hőforrás teljesítményétől és a mozgási sebesség beállításaitól függ. A hőforrás teljesítményének növekedése esetén a munkadarab hőmérséklete a vonalenergiával arányosan nő. Abban az esetben, ha a munkadarabot mozgó koncentrált hőforrás éri, a kialakult hőmérsékleti mező izotermikus felületei a mozgási sebesség növelése következtében a hőforrás mögötti övezetben összeszűkülnek. Nyugvó, összpontosított hőforrás esetén a hőmérsékleti mező szimmetrikusan helyezkedik el a hőforráshoz képest. Mind a két jellemző arányos növekedésével az izotermákkal által határolt övezetek hossza a teljesítmény vagy a sebesség emelkedésével arányosan növekszik.

2.3 Kísérleti paraméterek

A kiválasztott Rykalin-3D modell alkalmazása során a hőciklus létrehozásához a hőfizikai jellemzők megadása mellett kiválasztható, mely technológiai értéket szeretnék megadni, a vonalenergia vagy a kívánt hűlési idő ($t_{8,5/5}$) értékét (4. ábra). A követelményeknek megfelelő hegesztett kötés létrehozásához szükséges hegesztési paraméterek és hegesztési hőmérséklet tartomány meghatározását nagyban segíti a nagyszilárdságú acélokra jellemző hűlési idő tartomány ismerete, így ezen paraméter megadása mellett döntöttünk [4]. A kísérlet során a három hőhatásövezetet két különböző hűlési idő megadásával készítettük el, melyek kiválasztása az alapanyaggyártó cég (SSAB) előírásai alapján történt, miszerint az általunk vizsgált WELDOX 960 jelzésű acél esetén az optimális hűlési idő tartomány határértékei 5 és 15 s. Ezen hűlési idő értékek mellett az előbbi esetén 1015 J/mm, utóbbi esetében pedig 3046 J/mm vonalenergia értéket kaptunk. Eddigi tapasztalatok alapján a tartomány alsó széléhez közelítő hűlési idő alkalmazása esetén a hidegrepedések megjelenésének kockázata nő, míg a felső határhoz való közelség a szilárdság és a szívósság csökkenését eredményezi.

A hőciklus létrehozásához szükséges további paramétereket kiválasztásához egy korábban végrehajtott kísérlet eredményei szolgáltak alapul [4].

A három hőhatásövezeti zóna előállításához szükséges csúcshőmérsékletek meghatározása során figyelembe véve a korábbi kísérlet [10] eredményeit a finomszemcsés övezet csúcshőmérsékletét szintén 900 °C-ban határoztuk meg, míg a durvaszemcsés övezet és a részlegesen átkristályosodott övezet hőmérsékletét megemeltük. Az előbbi övezet esetében 1200°C-ról 1350°C-ra, az utóbbi övezet esetében pedig 750°C-ról 800°C-ra .

A hőciklus előállítása szükséges további adatok:

- előmelegítési hőmérséklet: 200 °C
- hevítési sebesség: 500 °C/s
- hőtartás a csúcshőmérsékleten: 1 s
- hűlési idő meghatározására szolgáló hőmérsékletek: $-T_1 = 850\text{ °C}$
 $-T_2 = 500\text{ °C}$

A hőfizikai jellemzők megadásánál figyelembe véve, hogy az általunk vizsgált anyag gyengén ötvözött egy általános rendeltetésű szerkezeti acél anyagjellemzőit használtuk fel, illetve az előmelegítési hőmérséklet megválasztása során szintén a korábbi kísérlet tapasztalatai alapján a CET szerinti minimális előmelegítési hőmérséklettől nagyobb érték megadása mellett döntöttünk.

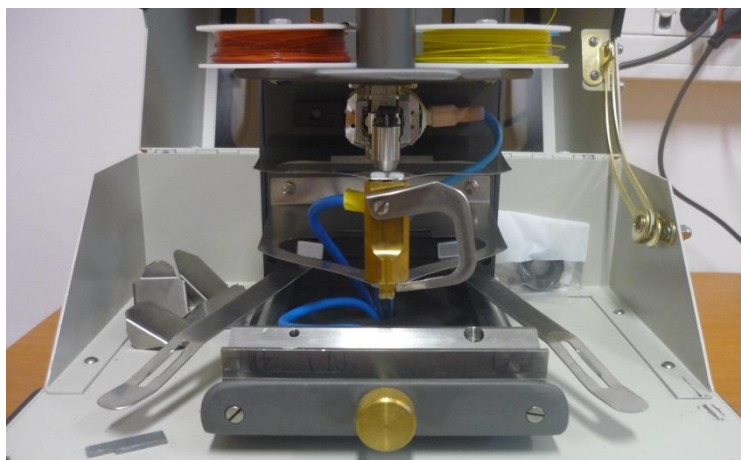
A hőhatásövezeti teszt végrehajtásához a GLEEBLE alkalmazási kézikönyve szerint a Charpy-féle ütővizsgálatnak megfelelő keresztmetszetű (10x10 mm) próbatestek kimunkálása szükséges, azonban hosszúságuk minimum 60 mm legyen. A próbatest hosszának meghatározása során az elérni kívánt hűlési sebesség értékét kell figyelembe venni. Intenzívebb hűtés elérése érdekében minél hosszabb próbatestre van szükség a befogópofák és a próbatest közötti nagyobb érintkezési felület létrehozása érdekében. A korábban végzett kísérlet alapján 70 mm hosszúságú próbatest kimunkálása mellett döntöttünk [10].

A 12 mm vastagságú lemezünkből hőhatásövezetenként és hűlési időnként 4 darab próbatestet munkáltunk ki. Három darabot az ütővizsgálat elvégzéséhez, illetve egy darabot mikroszkópi felvételek és keménységvizsgálat készítéséhez. A három övezetre és két hűlési időre vetítve összesen 24 darab próbatestre volt szükségünk a vizsgálat végrehajtásához. Az esetleges problémák miatt természetesen a szükségesnél több próbatest kimunkálása történt. A vizsgálat sikerességének érdekében a próbatestek precíz kimunkálására van szükség, nem megfelelő merőlegesség illetve rossz felületi minőség esetén az előállított hőhatásövezeti zóna aszimmetrikus lehet, esetleg nem jön létre a próbatest teljes keresztmetszetén.

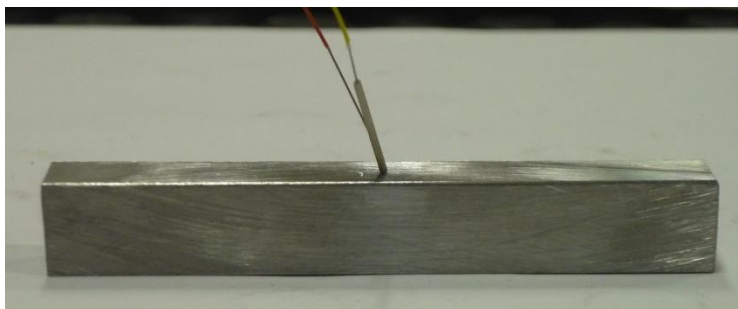
A GLEEBLE rendszerhez tartozó precíziós ellenálláshegesztő célgéppel a próbatestek felületére csatlakoztatott termoelemek mérik a hőciklus előállításához beállított hőmérsékletet, illetve folyamatos visszacsatolást nyújtanak a megvalósuló hegesztési hőciklus szabályozási folyamatához. Utóbbi funkció azt jelenti, hogy a megvalósuló hőciklus hűlési szakaszában a berendezés a kiválasztott modell matematikai függvénye alapján szakaszosan

adagolja az áramerősséget. Ebből kifolyólag a termoelemek elhelyezésénél a pontos mérés érdekében ügyelni kell arra, hogy a próbatest közepén helyezkedjenek el, illetve fontos, hogy a vizsgálandó hőmérséklet tartományhoz tartozó termoelemet válasszunk.

A hőmérséklet tartományok függvényében két típusú termoelemet használtunk fel. A részlegesen átkristályosodott illetve finomszemcsés övezet esetében, melyek csúcshőmérséklete nem haladta meg az $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot „K” típusút (NiCr-Ni), míg a durvaszemcsés övezet létrehozása során az első esetben „R” típusút (PtRh-Pt). Utóbbi esetben azonban a termoelem a kis termofeszültség miatt a vizsgálat szempontjából fontos $850\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ tartományban szabályozási problémát okozott a berendezés számára, így ezen övezet előállításánál is K típusú termoelem alkalmazására tértünk át.

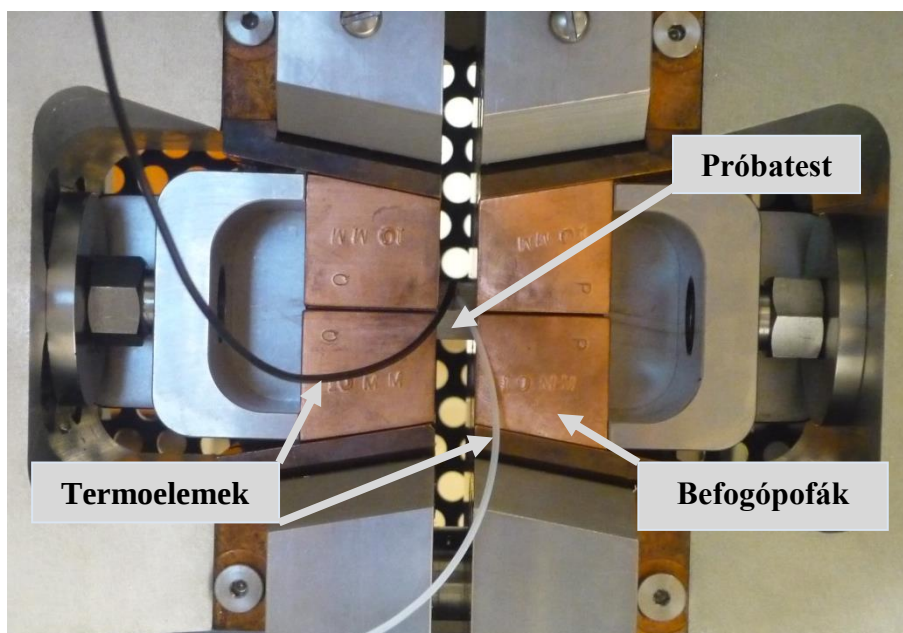


4. ábra Precíziós ellenálláshegesztő célgép a termoelemek próbatesten történő rögzítésére



5. ábra: Felhegesztett termoelem

A vizsgálat végrehajtásához szükséges vákuum előállítása után indítható a hőhatásövezeti teszt. A vákuum a felület revesedésének és dekarbonizációjának elkerülését szolgálja.



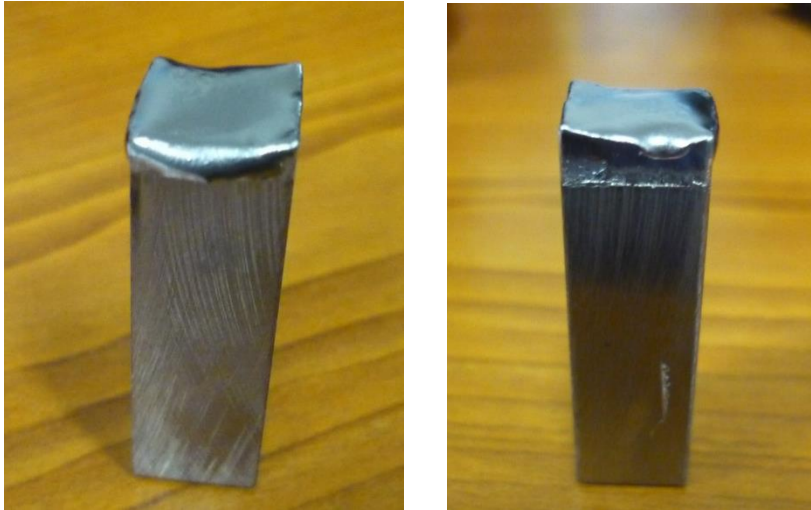
6. ábra: Próbatest befogási mód

2.4 Szimulációk végrehajtása

A megfelelő technológiai paraméterek beállítása, a termoelemek felhegesztése és a vákuum felállítása után elkezdhattuk az első hőhatásövezeti zóna előállítását. A hőhatásövezetek előállítása során rengeteg tapasztalati tényezőt ismertünk meg, melyek nagyban segítettek a szimuláció pontosabb megértését, illetve nagyban elősegítik a további kísérletek sikerességét.

A 24 db sikeresen reprodukált hőhatásövezeti zóna elkészítése három napot vett igénybe, a vákuum felállási idejének, illetve különböző technikai nehézségeknek köszönhetően. Legelőször az 5 s hűlési idővel előállított övezetek szimulációjával kezdtük, azon belül is a durvaszemcsés övezettel. Az első szimuláció során a próbatest szétolvadt. A sikertelen eredmény figyelmetlenségünkből adódott, ugyanis a paraméterek beállítása során a termoelem típusa nem volt megfelelően beállítva. A termoelem alkalmazása során nem csupán az adatok beállításához kell nagy figyelmet szentelni, hanem a felhegesztése során is. A különböző termoelemek hegesztési feszültsége eltér, így túl nagy feszültség alkalmazása során a termoelem és a próbatest között kialakuló kötés nem megfelelő, minek következtében termoelem a hőciklus előállítása folyamán a nagy hőmérséklet hatására sikertelen szimulációt eredményezve leválhat a próbatestről.

Ahogy a korábbi fejezetben írtam, az „R” típusú termoelem a 850-500°C tartományban a kis termofeszültség miatt szabályozási problémát okozott a berendezés számára, minek okaként több durvaszemcsés övezet előállítása sikertelenül történt.



7. ábra: Szétolvadt próbatest

A fizikai szimuláció eredményességét, mint korábbi fejezetben is írtam, nagyban befolyásolja a próbatest kimunkálása során annak méreteinek pontos betartása a befogó pofákkal történő érintkezése miatt. Nem megfelelő befogás, illetve a próbatestet hőtágulásból adódó mechanikai terhelés hatására a próbatest deformálódhat, megömlhet esetleg el is szakadhat. A durvaszemcsés zóna előállításakor a magas csúcshőmérséklet illetve az előbbieken felsorolt okok együttes hatására több szimuláció is sikertelen lett. (A hőmérséklet hatásának szerepét egy későbbi fejezetben(3.3.) kifejtem)



8. ábra: Megömlött és szétszakadt próbatest

Ezenkívül a befogópofák felületének rendszeres tisztításának elmulasztása esetén oxidréteg alakulhat ki a felületén, mely rontja a próbatesttel való érintkezés minőségét, ezáltal pedig aszimmetrikus vagy nem teljes keresztmetszeten létrejövő hőhatásövezetet eredményezhet. A befogó pofák tisztítására a megfelelő, gyártó által kijelölt tisztítószer alkalmazása ajánlott.



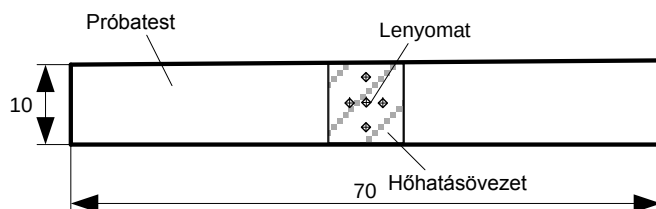
9. ábra: Aszimmetrikus hőhatásövezeti zóna a helytelen felületelőkészítés és befogás miatt

3. HŐHATÁSÖVEZETI ZÓNÁK TULAJDONSÁGAI

A mikroszkópi felvételekhez szükséges próbatestek előkészítését saját magam végeztem a laboráns segítségével és felügyeletével. Az előkészítés három szakaszból állt: csiszolásból, polírozásból és maratásból.

A csiszolási folyamat során a próbatestet felületét öt különböző finomságú csiszolópapír alkalmazásával végeztük, szám szerint: 120, 320, 800, 1200 és 2000. A csiszolást a felületek 3 μm -es gyémánt pasztás nedves polírozása követte, végül pedig a maratás a vasötvözetekhez általánosan használt 2%-os Nital marószert alkalmazásával történt.

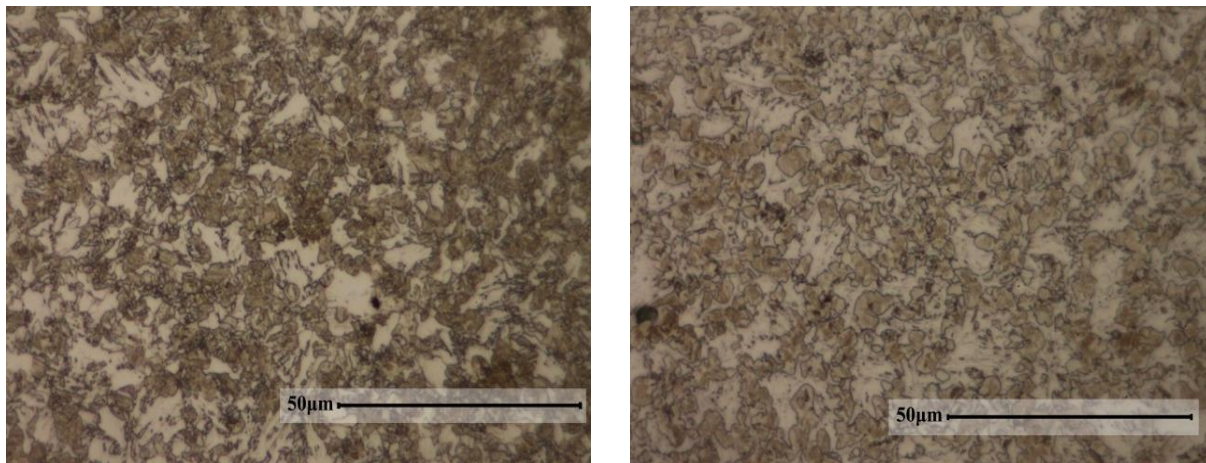
Az ütővizsgálatokat elvégzése -40°C -on történt. Az MSZ EN ISO 15614-1 alapján az ütővizsgálat során kapott értékeknek és az alapanyagszabványban rögzített ütőmunka értéknek összhangban kell lennie. Abban az esetben, ha a kimunkált három hőhatásövezetben bemetszett próbatest ütőmunka értékeinek átlaga legalább akkora, mint az alapanyagra előírt minimális ütőmunka, akkor ütővizsgálat szempontjából az eljárásvizsgálat eredményesnek tekinthető. Ez az érték -40°C -on S960QL acél esetén 30 J. Illetve hőhatásövezetenként legfeljebb egy-egy próbatest ütőmunka értéke lehet kevesebb az átlagértékre vonatkozó minimális ütőmunkánál, de minimum a 70° -át, azaz 21J-t el kell érnie. [8] A keménységmérést HV10 vizsgálati terhelés alatt végeztem el. Összesen 5 lenyomatot készítettünk, három lenyomatot a próbatest közepén a termoelemek vonalában, kettőt pedig a középső lenyomattól balra és jobbra.



10. ábra: Próbatesten készült lenyomatok keménységvizsgálat során

3.1 Részlegesen átkristályosodott zóna

A részlegesen átkristályosodott zóna szűk hőmérséklet tartománya miatt (A_1 és A_3 között) a megfelelő csúcshőmérséklet kiválasztása nagyobb nehézséget okozott. A korábbi kísérlet során a $750\text{ }^\circ\text{C}$ érték nem bizonyult elegendőnek az 5 s-os hűlési idő esetén (a hevítési sebesség függvényében A_1 hőmérséklet felfelé tolódik), ezért ezen kísérlet során a csúcshőmérsékletet $800\text{ }^\circ\text{C}$ -ra választottuk meg [8].



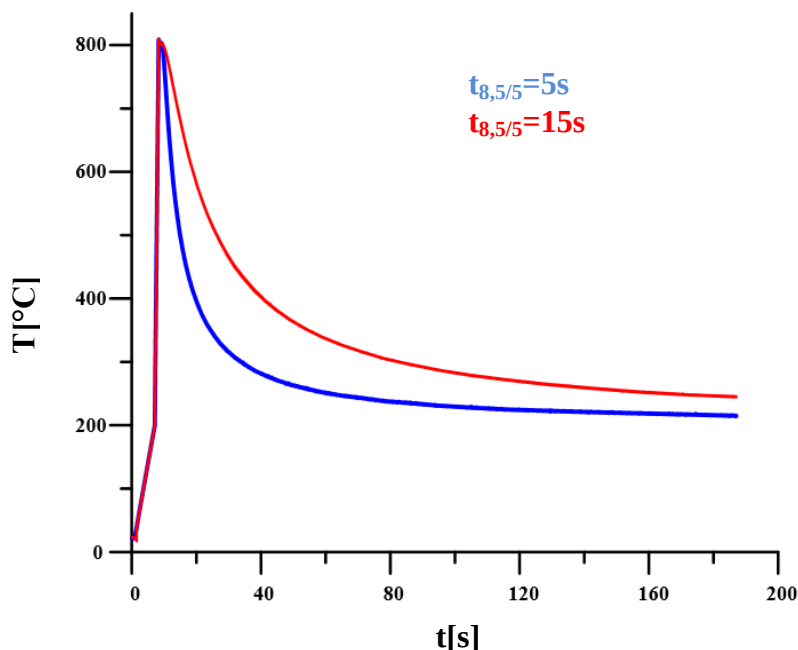
11. ábra: A részlegesen átkristályosodott zóna mikroszerkezete 5 és 15 s hűlési idő esetén($N=1000\times$)

Az eltérő hűlési idővel készült övezetek szövetszerkezete között $1000\times$ nagyítás mellett figyelhető meg igazán, hogy a lassabban hűlt próbatestek esetén az ausztenitesedett részek aránya az alapszövethez képest nagyobb.

A keménységmérés során HV10 vizsgálati terhelés mellett egy átlagos keménységet kaptunk eredményül, mivel ekkora terhelési érték mellett a keletkezett szemcsék mérete miatt a lenyomat több szemcsét érint. A kapott értékek a két hűlési idő esetében közel azonosak, 5 s esetén 348, míg 15 s hűlési idő esetén a keménység értéke 351 volt, mely értékek kis mértékben térnek el az alapanyag 330-340 HV keménységétől, megcáfolva a zónával kapcsolatos előzetes elvárásainkat, miszerint a keménység csökkenésére számítottunk. Az ausztenitesedett és az eredeti szövet keménységét egy Mitutoyo mikrokeménységmérő segítségével vizsgáltuk meg, a berendezés legkisebb vizsgálati terhelése, 10 g mellett. A hőciklus során megeresztődő alapszövet keménysége lecsökkent, szélső esetben 300 HV alá, ezzel szemben az ausztenitesedett részek keménysége sok esetben meghaladta a 400 HV-t.

Az ütővizsgálat során mind a két hűlési idő esetében az alapanyagon általunk elvégzett ütővizsgálati értékhez képest (160 J) kisebb energia értéket kaptunk. Az eredmények szórása mind a két hűlési idő esetén kis mértékű, illetve átlagértékük a keménység értékhez hasonlóan közel azonos lett. Kisebb hűlési idővel készült próbatest esetén 27 J, míg a nagyobb esetén 28 J átlagos ütőmunka elegendő volt a törés bekövetkezéséhez. Az eredményekből arra a

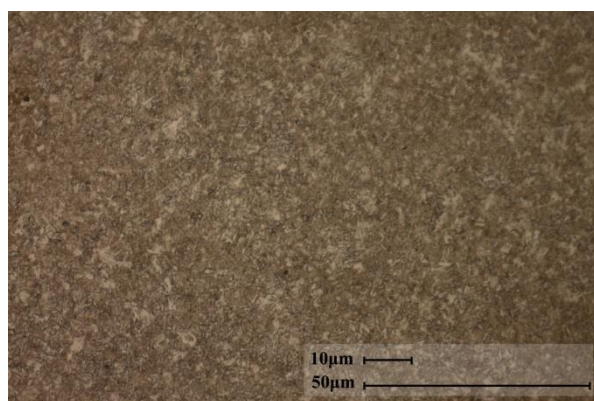
következtetésre jutunk, hogy ez a zóna inhomogén jellegéből adódóan meglehetősen rideg tulajdonsággal rendelkezik.



12. ábra: A két hűlési idő során a részlegesen átkristályosodott zóna előállítását célzó hegesztési hőciklus

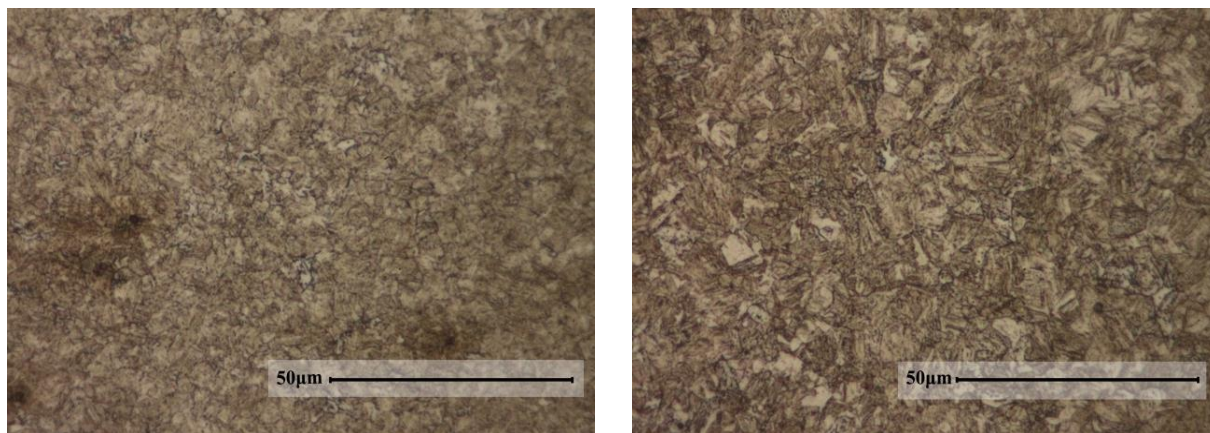
3.2 Normalizált zóna

Ezen hőciklus definiálása során a csúcshőmérséklet értékét 900 °C-ra választottuk, azonban az első szimulációból készült csiszolat szövetszerkezetéből azt a következtetést vontuk le, hogy 500 °C/s hevítési sebesség és 1 s hőntartás mellett az A_3 felfelé tolódása miatt (A_{c3}) még nem történik meg a teljes ausztenitesedés, ezért a további kísérletekhez 950 °C-ra módosítottuk a csúcshőmérsékletet.



13. ábra: A normalizált zóna előállítása $T_{\max} = 900^\circ\text{C}$ -on 5 s hűlési idő esetén ($N=1000\times$)

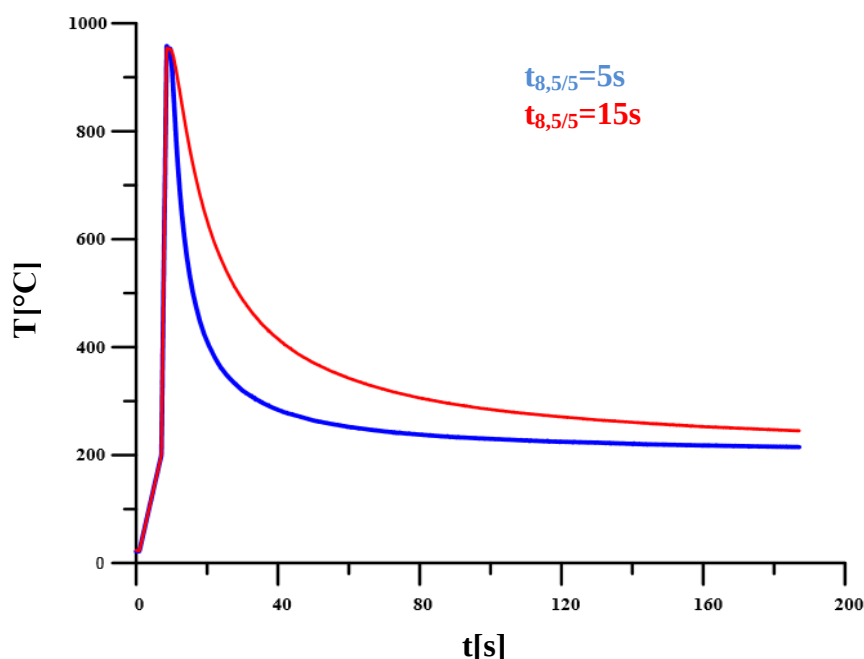
A felvételek vizsgálata során, a csiszolati képeken látható, hogy az alapanyagéhoz képest is finomabb szövetszerkezetet (szemcseméret: 3-5 μ m) kaptunk, illetve megfigyelhető, hogy a nagyobb hűlési idővel készült próbatesten a szemcseméreték kis mértékben megnövekedtek, valamint a korábbi szimulációkhoz képest a zóna szélessége is nagyobb lett .



14. ábra: A normalizálási zóna mikroszerkezete 5 és 15 s hűlési idő esetén(N=1000x)

Az előző zónával ellentétben a keménységvizsgálatkor kapott értékek között jelentős különbséget tapasztaltunk. A lassabban hűlt próbatest esetén 363, míg a gyorsabban hűlt esetében az átlagos keménység 417. Érdeemes megjegyezni, hogy a előző esetben a kapott keménység érték kis mértékben tér el a részlegesen átkristályosodott zóna kapott értékétől.

Az ütővizsgálat eredményei alapján, az alapanyagon végzett keménység értékektől kis mértékben eltérő fajlagos ütőmunkaértéket kaptunk.. A két hűlési idő között szintén nem tapasztaltunk nagyobb mértékű eltérést, 5 s $t_{8,5/5}$ esetén 103 J, míg 15 s esetén 99 J volt elegendő a törés bekövetkezéséhez, mely eredmények alátámasztották ezen zónával elvárt kiváló szívóssági tulajdonságot.

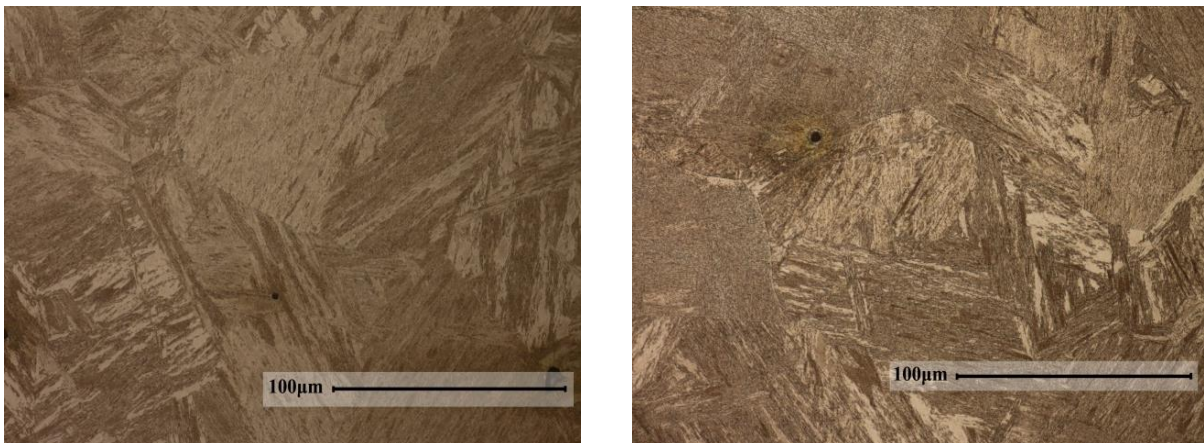


15. ábra: A két hűlési idő során a normalizált zóna előállítását célzó hegesztési hőciklus

3.3 Szemcsedurvulási zóna

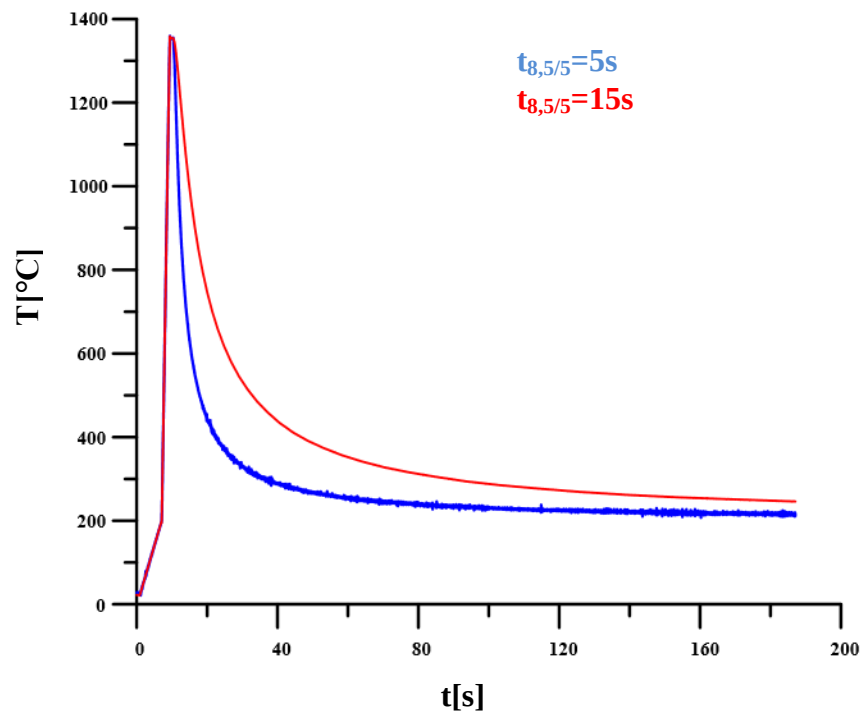
A szemcsedurvulás jelensége már 1100 °C-on megkezdődik, a paramétereinek meghatározása során a csúcshőmérséklet értékét a lehető legdurvább szemcsék előállításának érdekében a likvidusz hőmérsékletéhez közel határoztuk meg, valamint figyelembe vettük a korábban a GLEEBLE szimulátor segítségével meghatározott alapanyagra vonatkozó NST értéket (1403,8°C), mely hőmérsékleten az anyag lényegében nem képes elviselni semmilyen mértékű mechanikai terhelést.[11] Ezen okok miatt a választott csúcshőmérséklet 1350 °C volt. Az NST hőmérséklet figyelembe vétele a korábbi 2.3. fejezetben kifejtett okok miatt is lényeges.

A hőciklus előállítását követően a mikroszkópi felvételeken szinte szabad szemmel látható, hogy sikerült a hőhatásövezetben előforduló legnagyobb méretű szemcséket előállítani, mind a két hűlési idő esetében, valamint megfigyelhető, hogy a nagyobb hűlési idő esetén a durvaszemcsés övezet szélesebb tartományban állt elő, valamint szemcseméretbeli különbségek is tapasztalhatók.

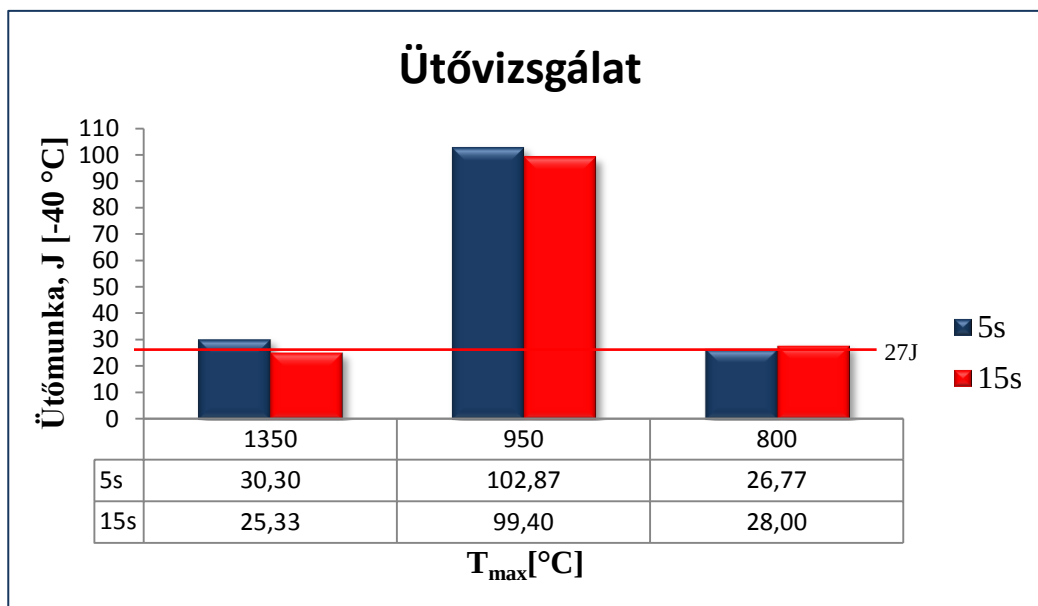


16. ábra: A szemcsedurvulási zóna mikroszerkezete 5 és 15 s hűlési idő esetén (N=500x)

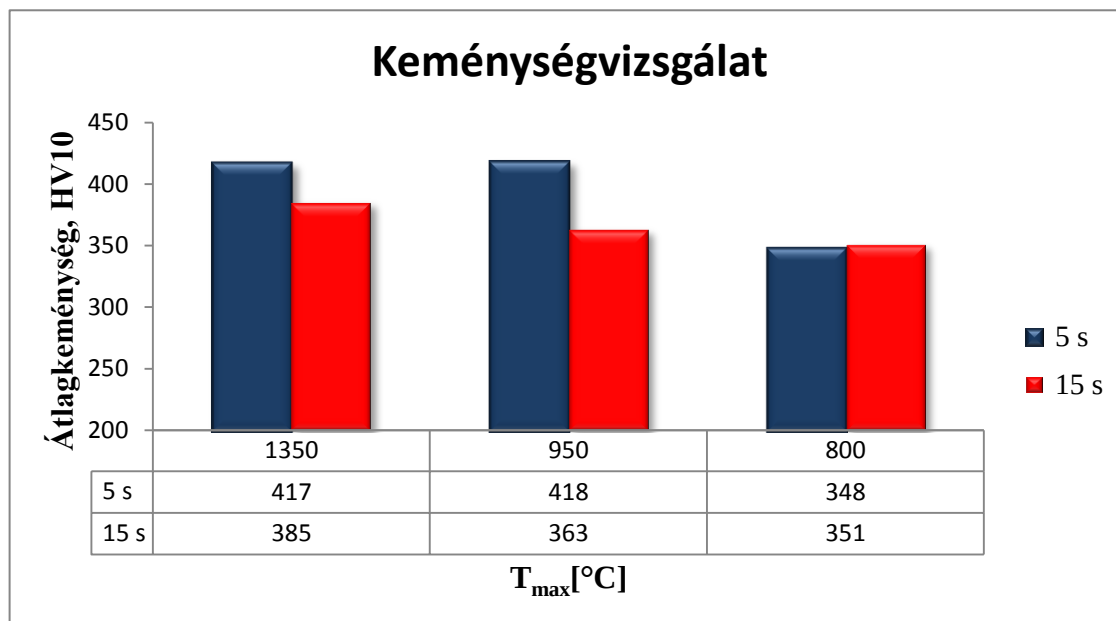
A keménységmérés kapcsán érdemes megemlíteni, hogy a normalizált zóna 5 s hűlési idejű próbatestéhez tartozó átlagos keménységérték szinte megegyezik az 5 s hűlési idővel hűlt próbatest durvaszemcsés övezetének átlagos keménységével, melynek értéke 417, míg a 15 s hűlési idővel hűlt darabé pedig 385 volt, amely körülbelül 20 HV értékkel több, mint a normalizált zónáé. A kapott eredmények a várakozásoknak megfeleltek, a jelentős keménység és a csekély ütőmunka érték igazolja a szívósság csökkenését.



17. ábra: A két hűlési idő során a szemcsedurvulási zóna előállítását célzó hegesztési hőciklus



18. ábra: Ütővizsgálati eredmények



19. ábra: Keménységvizsgálati eredmények

ÖSSZEFOGLALÁS

A tervezett három hőhatásövezet, név szerint a durvaszemcsés, a finomszemcsés és a részlegesen átkristályosodott zóna közül, mind a hármát sikeresen előállítottuk a fizikai szimuláció segítségével, a keménység- és az ütővizsgálat elvégzéséhez megfelelő térfogaton. Mindhárom esetben a hőciklus modellt az acélra vonatkozó az alapanyaggyártó cég(SSAB) előírása szerinti optimális hűlési idő tartomány alsó(5s) és felső(15s) határértékek megadásával készítettük el.

Az elvégzett keménység- és ütővizsgálatok eredményei, illetve a mikroszkópi képek elemzése alapján a durvaszemcsés övezettel szemben várt eredmények beigazolódtak. Az alapanyagétól nagyobb keménység, illetve a csekély ütőmunka érték igazolja a szívósság csökkenését, valamint a gyorsabban hűlt próbatestek esetén nagyobb keménységértéket kaptuk.

A normalizált övezet mikroszkópi felvételeinek vizsgálata során látható, hogy a hegesztett kötésben előfordulható legfinomabb szemcseméretet sikerült előállítanunk. Az ütővizsgálatok eredménye alátámasztja a jó szívóssági tulajdonságokat. Érdeemes megfigyelni, hogy a gyorsabban hűlt próbatestek átlagos keménységértéke megegyezik az ugyanezzel a hűlési idővel készült durvaszemcsés övezet keménységeloszlásának átlagos értékeivel.

A részlegesen átkristályosodott zóna keménységvizsgálata során a várttal ellentétben nem tapasztaltunk csökkenést. A mikrokeménység vizsgálat során tapasztaltam, hogy a megeresztett alapanyag és az ausztenitesedett részek eltérő eredményeiből látható az övezet inhomogén jellege. Ezen inhomogenitás valamint az alacsony ütőmunka értékek alapján arra jutottam, hogy a zóna meglehetősen rideg tulajdonságokkal rendelkezik.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

Irodalomjegyzék

- [1] Tisza, M.: Az anyagtudomány alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, 2008
- [2] Balogh A., Sárvári J., Schäffer J., Tisza M.: Mechanikai Technológiák, 4. kiadás, Miskolci Egyetemi Kiadó, p.:143-270., 2008
- [3] Komócsin, M.: Nagyszilárdságú acélok és hegeszthetőségük , Hegesztéstechnika, XIII. évf. 1. sz., p.: 5-9., 2002
- [4] Gáspár, M.; Balogh, A.: Hegesztéstechnológiai paraméterablak nagyszilárdságú acélok hegesztésénél, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., p.: 11-16., 2012
- [5] Szunyogh, L.: Hegesztés és rokon technológiák Kézikönyv, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007
- [6] Balogh, A.; Gáspár, M.: Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója, Hegesztéstechnika, XXXIII. évf. 3. sz., p: 23-28., 2012
- [7] Gáti J.: Hegesztési Zsebkönyv, Cokom Kft, Miskolc, 2008
- [8] Gáspár M.: A Nemesített állapotú nagyszilárdságú acélok hagyományostól eltérő hegesztési megoldásai középvastag lemezeknél (Hegesztő szakmérnöki diplomaterv), 2013
- [9] Koritárné Fótos, R.; Koncsik, Zs.; Lukács, J.: A fizikai szimuláció és alkalmazása az anyagtechnológiákban, „Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban” című konferencia, Szolnok, 2012
- [10] Gáspár, M.: Nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések hőhatásövezetének vizsgálata fizikai szimulációval, Műszaki- és földtudományi szekció, Tavaszi Szél Konferencia, Sopron, 2013.05.31-06.02
- [11] Kuzsella L.; Lukács J.; Szűcs K.; Fizikai szimulációval végzett vizsgálatok S960QL jelű, nagyszilárdságú acélon, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., p.:37-42., 2012
- [12] Rykalin, N. N.: *Teplovie processzi pri szvarke*, Vıpuszk 2, Izdatelsztvo Akademii Nauk SZSZSZR, Moszkva, 1953. pp. 56.