



MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
MECHANIKAI TECHNOLÓGIAI TANSZÉK



Újdonság és új tapasztalatok – A fizikai szimuláció megismerése és alkalmazása a hegesztéstechnológiákban

Novelty and new experiences – Physical simulation as an ultimate tool to discover the weldabilities

Készítette:

Témavezető:

Szűcs Katalin

BSc Műszaki menedzser

G4-BTe

Dr. Lukács János

egyetemi tanár

2012

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	1
2. A FIZIKAI SZIMULÁCIÓ	2
2.1 A fizikai szimuláció fogalma, lényege.....	2
2.2 A fizikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban.....	3
2.3 A fizikai szimuláció fejlődéstörténete	6
2.4 A fizikai szimuláció alkalmazása a hőhatásövezet vizsgálatában	8
2.5 Esettanulmány bemutatása a fizikai szimuláció egy alkalmazási területére.....	9
2.6 A Gleeble szimulátorok segítségével végzett vizsgálatok előnyei, hátrányai	11
3. A FIZIKAI ÉS MATEMATIKAI SZIMULÁCIÓ KAPCSOLATA.....	12
3.1 A matematikai (számítógépes) szimuláció	12
3.2 A fizikai és matematikai szimuláció összehasonlítása, kapcsolata.....	15
4. A MELEGREPEDÉKENYSÉG PROBLÉMÁJA.....	18
4.1 Repedésképződés hegesztéskor	18
4.2 A melegrepedések.....	18
5. HEGESZTHETŐSÉGI, MELEGREPEDÉKENYSÉGI VIZSGÁLATOK	23
5.1 A vizsgálatok lényege	23
5.2 A vizsgált anyagminőség	25
5.3 A vizsgálóberendezés, a Gleeble 3500 fizikai szimulátor bemutatása	26
5.4 A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (NST) vizsgálata.....	29
5.5 Hegesztés szimuláció, melegsakító vizsgálatok.....	34
5.6 További lehetőségek	38
6. ÖSSZEFOGLALÁS	39
7. IRODALOMJEGYZÉK	42

Ábrajegyzék

1. ábra - A műszaki anyagtudomány tartalmi elemei és kapcsolatrendszerük ²	4
2. ábra - A pilot plant (PP) és a termelőberendezés (TB) technikai ablaka	5
3. ábra - Korai hőhatásövezet-szimulátor az amerikai Renssealer Politechnikai Intézetben az 1950-es évek elején	6
4. ábra - Gleeble 1500-as fizikai szimulátor az 1970-es évekből	7
5. ábra - Ausztenites rozsdamentes acélcső töretfelülete.....	10
6. ábra - VEA modellezés első lépései, CAD modell, előfeldolgozás.....	13
7. ábra - VEA megoldás, utófeldolgozás	14
8. ábra - Szelepház a beömlő rendszerrel és a felöntésekkel. A fehér vonalak a generált hálót szemléltetik. ¹¹	15
9. ábra - A matematikai modellezés (MM) technikai ablaka és ennek helyzete egy ipari termelőberendezés (TB) technikai ablakához képest ³	16
10. ábra - A fizikai szimulátor (FSZ) technikai ablaka és annak helyzete egy ipari termelőberendezés (TB) technikai ablakához képest ³	17
11. ábra - Olvadt zóna és környezete, hőhatásövezet ¹³	19
12. ábra - Kristályosodási repedés körvarratban ¹³	20
13. ábra - Likvációs repedés körvarratban ¹³	22
14. ábra - Melegalakíthatósági görbék kiértékelése ¹⁵	25
15. ábra - S960QL acélból készült hegesztett szerkezetek ¹⁶	26
16. ábra - A Gleeble 3500 termo-mechanikus szimulátor a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén	27
1. diagram - A vezérlőjel és a próbatesten mért tényleges hőmérséklet ⁴	32
17. ábra - NST próbatest szakadási felülete, oldalnézet	33
18. ábra - NST próbatest szakadási felülete, felülnézet.....	33
2. diagram - A melegsakító vizsgálatok során alkalmazott hőmérséklet-idő diagram és a konkrét vizsgálati hőmérsékletek ⁴	35
3. diagram - A szakítószilárdság értékek a hőmérséklet függvényében ⁴	36
4. diagram - Kontrakció értékek a hőmérséklet függvényében ⁴	37

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi évek fáradozásainak gyümölcseként egy különleges, rengeteg lehetőséggel kecsegtető új berendezés, a fizikai szimulátorok legújabb és legkorszerűbb képviselője a Gleeble 3500 típusú multifunkciós termo-mechanikus rendszer került telepítésre a Miskolci Egyetemen. A beruházás jelentőségét jelzi, hogy az országban eddig csupán egyetlen ilyen eszköz állt a kutatók rendelkezésére. Egy ilyen a korszerű technológia és kutatás homlokterébe tartozó rendszer birtokában – melyet a dolgozatomban részletesen ismertetni fogok – olyan hazai és nemzetközi projektek keresett partnere lehet Egyetemünk, amelyekhez ez idáig nem volt meg a kellő technológiai, eszköz, műszer, és információs háttere.

A fizikai szimuláció anyagvizsgálat területén történő alkalmazása egészen a XX. század közepéig nyúlik vissza és a hegesztés volt az első technológia, ahol sikerrel alkalmazták. E korban jelentős problémák megoldásait szolgáltatta. Egy fizikai szimulátor pótolhatatlan segítsége a manapság oly nagy szerepet játszó tudatos anyag- és technológiatervezésnek, egyedülállóan és hatékonyabban képes különböző folyamatok valósidejű szimulálására, időt, költséget megtakarítva.

Dolgozatom célja, képet adni a módszer lényegéről, sajátosságairól, mai szerepeiről, összehasonlítva miben más és miben nyújt új eredményeket más szimulációs technikákhoz képest. Magát a berendezést is megismerhetjük, és egy meghatározott anyagminőségen végzett vizsgálatssorozattal pedig szeretném bemutatni, hogyan is alkalmazható a varratok melegrepedés-érzékenységi vizsgálataiban. Részletesen tárgyalom az elvégzett vizsgálatok elméleti hátterét, menetét, a kapott adatokat, eredményeket valamint a levonható következtetéseket.

2. A FIZIKAI SZIMULÁCIÓ

2.1 A fizikai szimuláció fogalma, lényege

Az anyagfeldolgozó eljárások fizikai szimulációja olyan laboratóriumi körülmények között végzett modellezést jelent, amely során pontosan reprodukáljuk azokat a termikus és mechanikus folyamatokat, amelyek a tényleges feldolgozás során érik az adott anyagot. A végső felhasználás körülményeit létrehozva az anyag vagy szerkezet működés közbeni viselkedését is vizsgálhatjuk, a hatásokat elemezhetjük.¹

A valóságot minél inkább megközelítő körülmények között és paraméterekkel zajlanak a folyamatok egy zárt, mérőeszközökkel felszerelt környezetben, az eredmények pedig valós problémákra nyújtanak megoldást. Vegyünk egy példát, miben tér el a fizikai szimuláció egy általános értelemben vett vizsgálattól. Meglehetősen egyszerű egy kemencében, egységes hőmérsékleten felhevíteni egy próbatestet, majd nyomóhatásnak kitéve megmérni a deformáció mértékét az adott hőmérsékleten. Ez egy fizikai vizsgálat, ha helyesen végezték, reprodukálható eredményekkel szolgál. Ha azonban egy kiválasztott eljárás során nyerhető anyagszerkezet elérése a cél, vagy egyszerűen csak annak jobb megértése érdekében magát az eljárást szükséges modellezni, fizikai szimulációt kell elvégezni. Nézzünk egy konkrét esetet: meg szeretnénk tudni, hogyan kell beállítani egy hengerlő berendezést egy új ötvözet használatakor. Ehhez több információra van szükség. Aki valaha is megfigyelt acélt hengerlés közben, észrevehette, hogy az acéllap szélei és sarkai sötétebbek a lemezttest többi részéhez képest. Ennek oka, hogy ezek a területek gyorsabban hűlnek a lap belsejénél. Vagyis a teljes acéllapon nem egy egyenletes hőmérséklet oszlik el, hanem úgynevezett termikus gradiensek, átmenetek találhatók a melegebb és hidegebb területek között. Termikus gradiensek csaknem minden fémgyártási-, feldolgozási folyamatban jelen vannak, és hatást gyakorolnak az anyag alakíthatóságára, ezáltal a megmunkálhatóságára. Ebből kifolyólag előbb fizikai szimuláció útján létre kell hozni és megvizsgálni a termikus gradienseket és egyéb fontos folyamatbeli tényezőket, így a gyártási-, feldolgozási folyamatban sikeresen használható információkhoz lehet jutni. Példánkban a szimuláció három lépésből áll, elsőként reprodukálni kell a lap sarkának majd szélének egy részét,

végül pedig egy belső résznek megfelelő anyagminőséget kell előállítani, és ezeket külön vizsgálni. A kapott eredményeket összekapcsolva létrejön egy pontos előrejelző modell, és eszerint már megfelelően be lehet állítani a termelő berendezést.¹

A fizikai szimuláció egyaránt alkalmas anyag- és folyamatmodellezésre, valamint anyagtudományi vizsgálatok elvégzésére is. Felhasználási területei a teljesség igénye nélkül a következők:

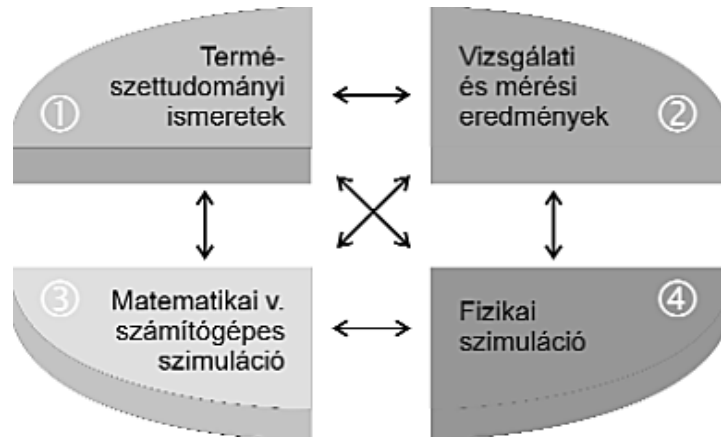
- *Alkalmazások:* hegesztés, folyamatos öntés, meleghengerlés, folyamatos izzítás, kovácsolás, hőkezelés, porkohászat, szinterelés, diffúziós kötés, stb.
- *Vizsgálatok:* termikus/mechanikus törés, melegalakíthatóság, folyamatos hűtési átalakulás, folyamatos hevítési átalakulás, izotermás izzítás, stb.
- *Anyagismeret:* diffúzió, feszültségrelaxáció, olvadás és szabályozott dermedés, újrakristályosodás, edzés, stb.

A fizikai szimuláció mindig valósídejű, még az úgynevezett gyorsított szimulációk esetében is, mint például a gyorsított kúszásvizsgálat, amikor a próbatestben lejátszódó folyamatok természetesen szintén valós idejűek, csak a vizsgálat paraméterei úgy vannak módosítva, hogy a kapott reakció rövidebb idő alatt játszódjon le.¹

2. 2 A fizikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban

A műszaki anyagtudomány definiálása nem könnyű feladat, lényegében a tudatos anyag- és technológiatervezés tudományának tekinthető. Hogy milyen szerepet tölt be ezen belül a fizikai szimuláció, leginkább úgy érthetjük meg, ha megvizsgáljuk a műszaki anyagtudomány tartalmi elemeit, valamint hogy ezek hogyan kapcsolódnak egymáshoz, vagy hogyan egészítik ki egymást.²

A négy tartalmi elemet a köztük lévő kapcsolatokkal az 1. ábra mutatja be.



1. ábra - A műszaki anyagtudomány tartalmi elemei és kapcsolatrendszerük²

Kapcsolatrendszerüket szemléljük most a kutatás-fejlesztés folyamatának vizsgálatával. E tevékenységre akkor van szükség, ha valamilyen ismert vagy új piaci igény jelentkezik, a K+F tevékenység ennek kielégítésére irányul. Ez történhet meglévő anyagok és technológiák felhasználásával, ilyenkor a kutatás alapját a már meglévő tapasztalatok, szabványos, adatbázisok képezik. De előfordul, hogy új tulajdonság-együttesű anyagra van szükség.

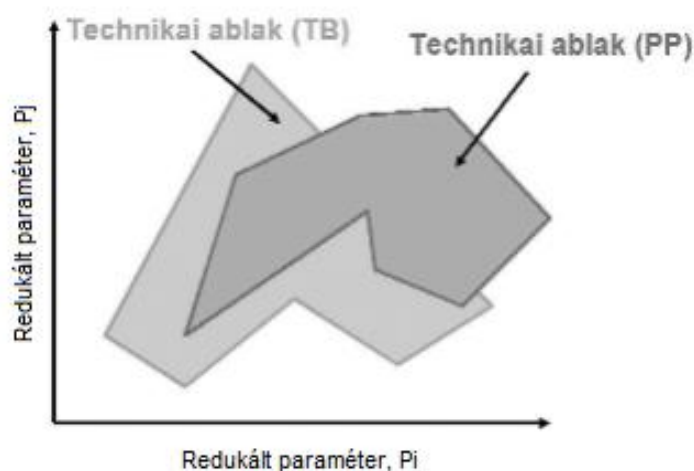
Ekkor első lépésként meg kell határozni milyen tulajdonságok mellett elégíti ki az új anyag a kívánt funkciót. Ilyen szemszögből nézve az anyagot, mint tulajdonság-együttes hordozóját tekintünk, és kérdéses, vajon létezik-e bármely tulajdonság-együtteshez hordozó. Minél mélyebb ismerettel rendelkezünk az anyagszerkezet és a tulajdonságok közötti kapcsolatokról, annál közelebb kerülünk az úgynevezett molekuladinamika alkalmazásához, mely kívánt hatású molekulák megtervezését jelenti. Ám ez manapság még nem jellemző a műszaki anyagtudományra.

A szerkezet és tulajdonság összefüggéseinek megismeréséhez vezető úton meghatározó szerepük van a korszerű mérési- és vizsgálati technikáknak. A mérés és vizsgálat azonban eltérő fogalmak. A vizsgálat tágabb értelmű, többféle mérésből áll és célja valaminek a megismerése, vagy valamely ok jobb megértése. A mérésnek két fajtája van, az egyik, mikor a mérés befejezte utána vizsgált tárgy állapota és tulajdonságegyüttese nem változik, sőt erre törekedni is kell, például egy szövetminta tanulmányozásra való előkészítésekor. Másik típusa, mikor a mérendő objektumot egy külső hatásnak – termikus, mechanikai vagy kémiai – tesszük ki és a reakciója

jellegéből és mértékéből jutunk információhoz. Ilyen például a termikus analízis vagy a különböző szakítóvizsgálatok.

A technológiai folyamatok reprodukálására többféle modellezés is adott. A modellezések csak akkor hatékony kutatási eszközök, ha lefedik, sőt meghaladják az ipari termelőberendezés technikai ablakát. A technikai ablak megmutatja, hol vannak az adott berendezés vagy módszer határai, meddig valósulhat meg a gyártás. Dimenzióit számos paraméter együttesen határozza meg.²

Egyik módszer a modellezésre a termelőberendezés kicsinyített másának megépítése, melyben tulajdonságai és a megmunkálandó anyagra gyakorolt hatása közel megegyezik az ipari berendezésével. Technikai ablakuk tehát átfedő jellegű, mint ahogy azt a 2. ábra is szemlélteti. Ezek az úgynevezett pilot plantek, melyek kivitelezése magas költségük miatt csak lényegesen új ötletek megvalósításakor fizetődik ki.



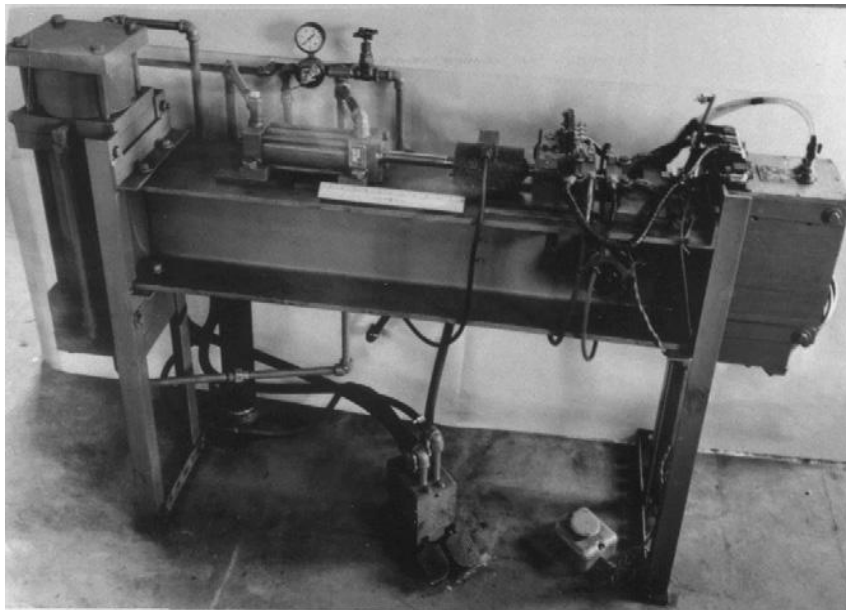
2. ábra - A pilot plant (PP) és a termelőberendezés (TB) technikai ablaka³

A fizikai szimuláció abban tér el az előző módszertől, hogy itt nem a kicsinyített termelőberendezés kerül megépítésre, hanem a termelőberendezésben lezajló termikus és mechanikus folyamatok ismeretében olyan eszközt alkalmazunk, ami lefedi az ipari technikai ablakát, sőt sokkal szélesebb is annál. A fizikai szimulátorokkal végzett munka 5-10-szer hatékonyabb, mint a pilot plant berendezéssel végzett.³

A fizikai szimuláció tehát új technológiákat is tesztelhet, melyekkel kívánt viselkedésű és tulajdonságú anyagösszetételek hozhatók létre. Ez az anyagtudományi kutatás-fejlesztés legújabb irányvonala, és ebben van a fizikai szimulációnak meghatározó szerepe.

2.3 A fizikai szimuláció fejlődéstörténete

A fizikai szimuláció fémipari alkalmazására először a XX. század közepén találunk említést a szakirodalomban. Eleinte a kutatók maguk terveztek és építettek kísérleti berendezéseket, melyek javarészt a hegesztés akkori problémaköreit hivatottak vizsgálni. A 3. ábra egy ilyen korai szimulátort szemléltet. Ilyen irányú kísérletek zajlottak az egykori Szovjetunióban, a mai Ukrajnában, az E. O. Paton Hegesztési Intézetben, Kínában a Központi Vas és Acél Intézetben, Nagy-Britanniában a Hegesztési Intézetben, valamint az Amerikai Egyesült Államokban a Rensselaer Politechnikai Intézetben zajlottak.⁴



3. ábra - Korai hőhatásövezet-szimulátor az amerikai Rensselaer Politechnikai Intézetben az 1950-es évek elején⁵

A fizikai szimuláció elsőként tehát a hegesztés tanulmányozásában játszott szerepet. Olyan berendezésre volt szükség, mely mérésekre alkalmas környezetben képes

visszaadni a hőhatásövezet részeit. Az első olyan kereskedelmi forgalomban kapható szimulátor, melyet erre a célra terveztek, az USA-ban gyártott Gleeble 510 elnevezésű rendszer volt. A hegesztés hőciklusát reprodukálta, hogy miként hat a bevitt hőmennyiség az alapanyag szövetszerkezetére. Először az ömledék megszilárdulás utáni állapotát kívánták megismételni, majd a figyelem a hegesztett kötés hőhatásövezetének vizsgálatára irányult. Gyors, 8000 K/s hevítési sebességre volt képes és egy pneumatikus működtetésű terhelő (húzó) rendszerrel volt ellátva, amely állandó sebességgel történő húzást tett lehetővé. Képes volt húzóvizsgálat elvégzésére „bármely” hőmérsékleten.⁵

A termikus és a mechanikus rendszer programozása egy elektro-mechanikus generátor segítségével történt, amelyet ugyanaz a cég tervezett és gyártott. Két évtizeddel később a Suzuki és a Nippon Steel Corporation Japánban kifejlesztett egy technikát, amely képes volt a folyamatos öntési és megszilárdulási folyamatot szimulálni a Gleeble segítségével. A kezdeti munkák során egy módosított Gleeble 510 modellen dolgoztak, majd később elkészítették a Gleeble 1500-as modellt, amelynek szervohidraulikus mechanikai rendszere volt. A berendezést a 4. ábra mutatja.



4. ábra - Gleeble 1500-as fizikai szimulátor az 1970-es évekből⁶

Nagyszilárdságú acélokat a II. világháború után a hajóiparban kezdtek el alkalmazni. Ekkor azonban még nem rendelkeztek kellő információval a varratok viselkedéséről és

tulajdonságairól, ezért számos katasztrófa történt a kötési hibákból vagy helytelen alkalmazásból kifolyóan. Így vált kiemelt fontosságúvá a hőhatásövezet vizsgálata képlékeny alakváltozási és törésmechanikai szempontból.⁷ Az 1950-es évektől már rendelkezésre áll olyan rendszer, melynek segítségével a valós hőhatásövezet szövetszerkezetével teljes mértékben megegyező mintát hoztak létre. Eleinte a szimuláció során kapott ütmunka eredmények jobbnak bizonyultak, mint a hegesztett mintáké. Erre a hegesztés során lejátszódó fémtani folyamatok elemzése jelentette a megoldást, ahol rámutattak a hőmérsékleti gradiensek rácshiba képződésben játszott szerepére. A hőmérsékleti gradiensek miatt fellépő feszültségek csak képlékeny alakváltozás útján csökkenthetők. Így a berendezést kiegészítették egy mechanikus egységgel, amely a szimuláció során adott sebességgel a megfelelő hőmérsékleten képlékenyen alakítja a próbatestet. Ezzel a kiegészítéssel született meg a Gleeble termomechanikus szimulátor.⁸

1979-ben a Dynamic Systems, Inc. (DSI) piacra vezette a második generációs számító Gleeble 1500-as berendezést. Korszerű elektronikával és hidraulikus egységekkel rendelkezett és ellenállás hevítő rendszerrel is kiegészült. Ez az összeállítás új fizikai szimulációs alkalmazásokat tett lehetővé. A növekvő igényeknek megfelelően folyamatosan megjelentek továbbfejlesztett rendszerek, ilyen fejlesztések eredménye lett a Gleeble 3500-as rendszer megszületése is.⁴

2.4 A fizikai szimuláció alkalmazása a hőhatásövezet vizsgálatában

A Gleeble szimulációs projektek közel 70-80%-ának tárgya a valós és szimulált mikroszerkezetek tulajdonságai közötti összefüggések keresése. Egyszerűbbnek tűnhet tényleges hegesztési folyamatból származó próbatestet vizsgálni, mintsem olyan bonyolult eszközt használni, mint egy Gleeble szimulátor. Viszont a valós folyamatban olyan nagyok a termikus gradiensek, hogy a varrat melletti rész minden tizedmilliméterén más és más szövetszerkezet alakul ki.⁹ A hőhatásövezet egy kis térfogata is mikroszerkezetek sokaságát tartalmazza, így nagyon nehéz annak a szövetszerkezetnek az előrejelzése, amely a legkedvezőtlenebb tulajdonságokkal rendelkezik, és valószínűleg a kötés tönkremenetelét okozza majd a végső

felhasználáskor. Például a Charpy-V bemetszés rádiusza is túl nagy ahhoz, hogy egyetlen mikroszerkezetet tartalmazó lehessen kimunkálni a hőhatásövezetből. Ezért szükség van egy olyan berendezésre, amely képes nagy mennyiségben homogén, egyetlen szövetszerkezettel rendelkező anyagmintát előállítani.

2.5 Esettanulmány bemutatása a fizikai szimuláció egy alkalmazási területére

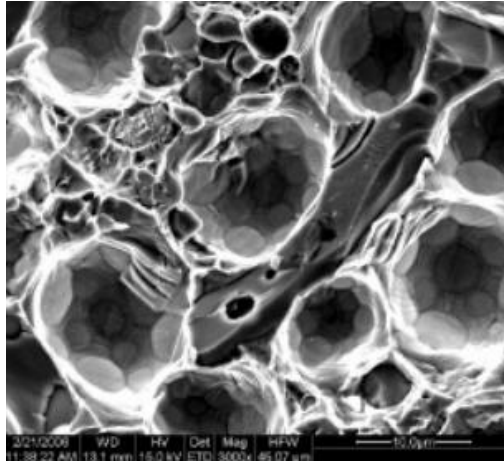
2.5.1 Hegesztéses javítás szimuláció, ausztenites rozsdamentes acél⁹

A termo-mechanikus szimuláció nemcsak az eljárások fejlesztésében vagy új ötvözetek esetében bizonyul hasznosnak, hanem segíthet felmérni a hegesztéses javítás lehetőségét is. Hatásos-e, megéri-e ezt a megoldást választani. Példaként válasszuk a folyamatos izzításos kemencékből vett besugárzó csövek hibáit és javításának egy módját.

Jellemzői:

- 127 mm átmérő
- 12,7 mm falvastagság
- centrifugál öntéssel készült ausztenites rozsdamentes acél
- 25 % Cr, 12% Ni tartalom

Ezek a csövek 950-1000°C között üzemelnek. Néhány ilyen termék szivárgásos meghibásodásának vizsgálatakor kiderült, hogy az ok a jelentős mennyiségű szemecseközi karbid kiválás, amely mentén repedések keletkeztek és továbbterjedtek. A töretfelületet az 5. ábra mutatja.



5. ábra - Ausztenites rozsdamentes acélcső töretfelülete

Gleeble szimulátorban az újrahevített próbatesteken, magas hőmérsékleten elvégzett szakítóvizsgálat után látható a közel megegyezés a valós és a szimulált törési felületek között. További információ nyerhető a szakítószilárdsági és alakíthatósági értékekből, melyek által megállapítható a csövek termikus károsodásának mértéke. A leírt hatásnak kitett anyag 3 év elteltével csak alakíthatóságának 21%-át tartja meg 900°C-on, illetve 32%-át 1050°C-on. Feltételezve, hogy a vizsgált cső a kemence 170 hasonló csöve közül reprezentatívnak tekinthető, levonható az a következtetés, hogy e termékek anyagjellemzőik alapján várható élettartamát jelentősen lerövidíti a magas hőmérsékletnek kitett állapot. Annak érdekében, hogy a használt csövek hegesztéses javíthatósága megállapítható legyen, egy károsodott csőből Charpy-méretű (10mm x 10mm x 55mm) próbatestek kimunkálására van szükség, majd ezek újrahevítésére a szimulátorban, alkalmazva egy durvaszemcsés hőhatásövezet-hőciklust, amely a bevont elektródás ívhegesztés javításánál használatos. A metallográfiai analízis mutat likvációs repedést mutat a hőhatás-övezetben, és a valós hegesztésen végzett vizsgálatok is megerősítik ezt a jelenséget. Így tehát kiderül, hogy a hegesztéses javítás szintén potenciális károsodást okoz, csak épp a probléma ez esetben nem a magas hőmérséklet-alapú törés, hanem a kötés részlegesen megolvadt zónájának törése. Ez alapján tehát a hegesztéses javítás lehetőségét el kell vetni, tekintélyes mennyiségű költséget és leállási időt megspórolva a vállalatnak. Ez a szimulációra alapozott, idejében meghozott döntés elegendő átfutási időt hagy új csövek megvásárlására, elfogadható áron.

2.6 A Gleeble szimulátorok segítségével végzett vizsgálatok előnyei, hátrányai

Előnyök:

- a fizikai folyamatok pontos és reprodukálható szimulációjára képes
- elegendőek a kisméretű próbatestek, alacsonyabb az anyagköltség
- a szimulációval létrehozott mikroszerkezet homogén, megbízhatóan vizsgálható
- megvalósítható és rugalmas, hasznos a tervezéskor, a gyártáskor és a felhasználáskor fellépő állapotok és problémakörök vizsgálatakor
- termikus és mechanikus hatások széles skálája alkalmazható magas értékekkel
- képes különválasztani a termikus és mechanikus hatásokat a folyamat közben

Hátrányok:

- csak elektromosan vezető próbatestek használhatók az ellenállás hevítés miatt (fémek és fémes kompozitok)
- jól kell ismerni a szimulálni kívánt folyamat paramétereit
- magas hűtési sebesség megvalósítása bonyolult, hélium vagy vízsugár alkalmazása szükséges hozzá
- a berendezés, a karbantartás és a felkészítő tréningek költségesek.⁹

3. A FIZIKAI ÉS MATEMATIKAI SZIMULÁCIÓ KAPCSOLATA

3.1 A matematikai (számítógépes) szimuláció

Számítógéppel segített mérnöki tevékenységről (CAE – Computer Aided Engineering) körülbelül az 1960-as évektől beszélhetünk. 1975-től létrejöttek a lineáris, az utóbbi években pedig a nemlineáris végelem-programmal integrált tervezőrendszerek. A végelem-módszer az elmúlt évtizedek és napjaink egyik leggyorsabban terjedő, nagy hatékonyságú számítástechnikai módszere.¹⁰ Így a matematikai szimuláció bemutatásához röviden tekintsük át a lényegét.

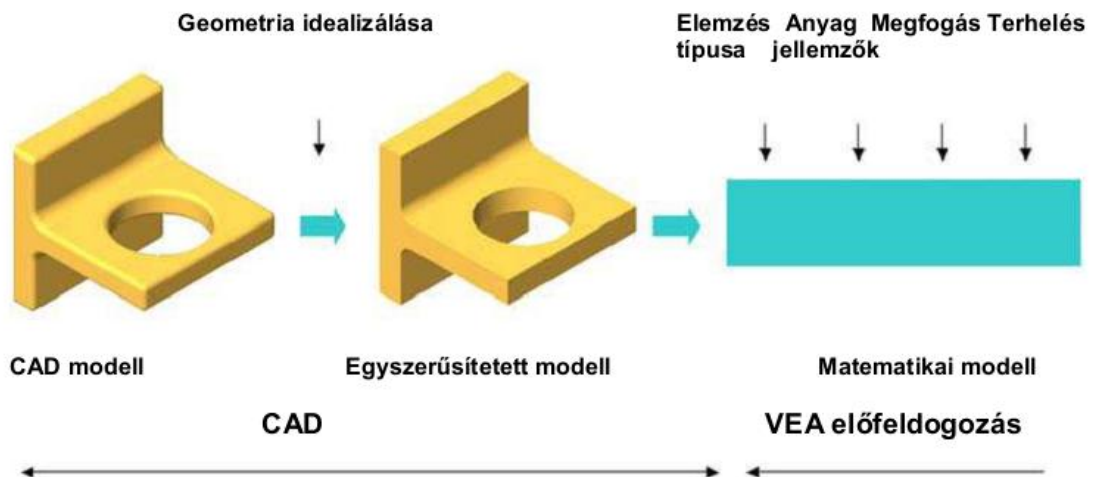
Kövessük végig egy végelelemes analízis (VEA) lépéseit és hibáit, hogy rávilágítsunk miben tér el a fizikai modellezéstől. VEA típusú szoftverek esetén a modellezés három lépésből áll. Elsőként az előfeldolgozás történik meg, ahol definálják az analízis típusát, anyagi jellemzőket, terheket, kényszereket, valamint végelemekre darabolják a modellt. A megoldás-szakasz, vagyis a kívánt eredmények kiszámolását követően pedig az elemzés, kiértékelés következik.¹¹ Másképp fogalmazva a szükséges lépések a következők:

1. a matematikai modell felépítése
2. a végelem modell felépítése
3. a végelem modell megoldása
4. az eredmények elemzése

Végezzünk el egy modellezést SolidWorks Simulation segítségével. Egy olyan korrekt geometriával kell kezdenünk, amelynek kicsi (tetraéder vagy háromszög) elemekre oszthatónak kell lennie. Ugyanis csak így jön létre a megfelelő hálózasi sűrűség, ami majd a pl. a feszültségek, hőmérséklet eloszlás, elmozdulások helyes meghatározásában játszik kulcsszerepet. Ennek érdekében gyakran szükségessé válik a CAD geometria módosítása, pl. részletek elvétele, tisztítás vagy idealizálás.

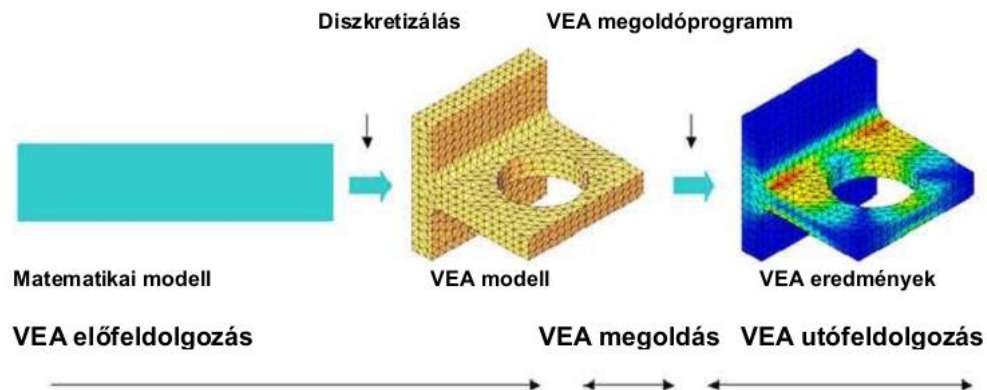
Részletek elvétele alatt olyan geometriai elemek eltávolítását értjük, amelyet a vizsgálat szempontjából elhanyagolhatónak ítélünk meg. Az idealizálás viszont már egy

komolyabb beavatkozást jelent, például szolid geometria esetében felületként kezelünk vékony falakat. A tisztítás pedig olyan elemek elvétele, amelyek végképp megnehezítik vagy lehetetlenné teszik a behálózást. A geometria módosításával csökkenthető a számítási idő. A végeelem modell felépítése következik, ami tehát nem más, mint a modell vizuális behálózása, más néven diszkretizálás.



6. ábra - VEA modellezés első lépései, CAD modell, előfeldolgozás

A végeselemes modell létrehozása után a szoftver valamely megoldó programjával kiszámoltatjuk a kívánt eredményeket. A végeelem hálózat minden meghagyott szabadságfoka egy-egy ismeretlent jelent. Szolid elemek esetén csomópontonként három ismeretlennel számol, ugyanakkor például hőmérséklet-gradiens meghatározásakor, mivel a hőmérséklet skalármennyiség, nem pedig vektor, az elmozdulást csak egy ismeretlennel számítja. Ezt a lépést követi az elemzés. Ez olykor nagyon nehéz, mivel a megoldás többféle adatot nyújt, amiket sokféleképpen jeleníthetünk meg. A helyes következtetésekhez számba kell venni az eddigi lépések során bevitt esetleges hibákat. Ilyenek pl. a modellezési vagy idealizálási hibák, diszkretizálási hibák és a megoldással járó numerikus (kerekítési, stb.) hibák.

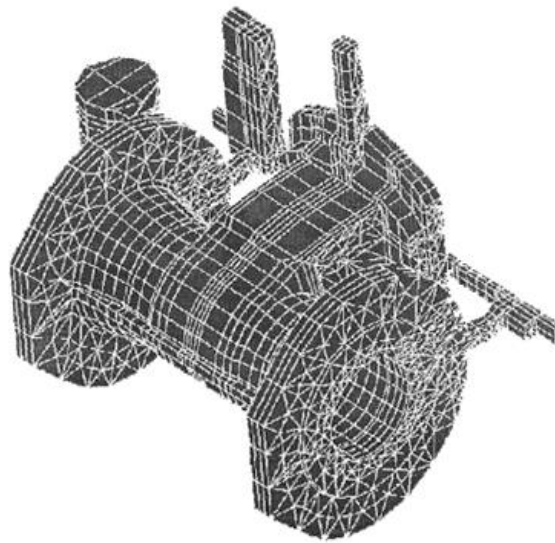


7. ábra - VEA megoldás, utófeldolgozás

Mint minden módszernek, a SolidWorks VEA szoftver alkalmazásának is vannak korlátai. Csak olyan feltételezések mellett végezhetünk vizsgálatot, mint hogy az anyag lineáris, statikus terhek hatnak és a szerkezeti deformáció kismértékű. Az eredmények nem érvényesek, ha bármelyik feltétel nem teljesül. A SolidWorks (Static) bár rendelkezik geometriailag nem lineáris megoldóval is, ám ennek csak alapértelmezett beállításai érhetők el, így e funkció alkalmazhatósága meglehetősen korlátozott.

Másik példaként nézzük meg egy öntvény (8. ábra) dermedési szimulációjának lépéseit¹¹:

1. öntvényrajz készítés CAD rendszerben
2. forma és beömlő tervezés
3. háló generálás
4. formatöltés szimulációja
5. hőmérsékletmező szimulációja
6. mikroszerkezet szimulációja
7. feszültség szimuláció
8. tulajdonság szimuláció.



8. ábra - Szelepház a beömlő rendszerrel és a felöntésekkel. A fehér vonalak a generált hálót szemléltetik.¹¹

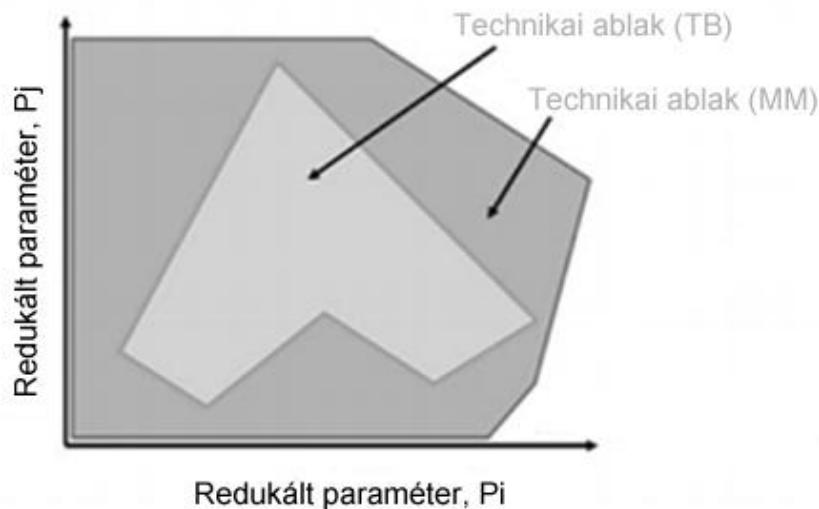
Ez a szimuláció is véges elem vagy véges differencia módszerrel számítja ki a hőmérséklet mezőt, az olvadékáramlást és a feszültség állapotot. Ezek után a megfelelő összefüggések ismeretében a tulajdonságok becsülhetők. Az összefüggéseket és a szimulációhoz szükséges egyenleteket, algoritmusokat vagy a szoftverekbe beépítve vagy adatbankokban találhatjuk.¹¹

3.2 A fizikai és matematikai szimuláció összehasonlítása, kapcsolata

A matematikai modellezés virtuális környezetben történik, míg a fizikai szimuláció során ténylegesen, valós időben játszódnak le a vizsgált folyamatok, miközben mérések végezhetők. A matematikai szimuláció a fizikaival ellentétben nem valós idejű, a folyamat sebessége függhet a számítógép teljesítményétől, a szoftvertől, vagy a kódolás színvonalától is. A mai szoftverek nagy teljesítményű, fejlett informatikai háttérrel igényelnek. Hátrányként említhető, hogy sok esetben nem szerezhetők meg a matematikai modellezéshez szükséges adatok a kötődő termelő berendezés fejlett műszerei ellenére sem.¹ Továbbá meglehetősen bonyolult egy hegesztett kötés hőhatásövezetének tulajdonságait – pl. törési szívósság – előre jelezni. Ekkor segíthet a fizikai szimuláció, összehasonlító adatok szolgáltatásával és a modellek

érvényességének tesztelésével.⁹ Egy számítógépes modell validálásához nélkülözhetetlen a fizikai szimuláció, ahol tesztelhető a modell helyessége. Lényeges levonnunk azt a következtetést, hogy a számítógépes és fizikai szimuláció szerves egységet alkot, egymást kiegészítve szolgálják az ipari fejlődést. Összekapcsolásukkal magasabb minőségű termékek állíthatók elő, kevesebb energia felhasználásával és kisebb környezeti terheléssel. Egy konkrét példával élve, a meleghegerlés számítógépes szimulációjával megfelelő meleghegerlési szűrősterv és hűtési stratégia dolgozható ki, ekkor az adatok akár online át is vihetők a termo-mechanikus szimulátorba, majd a megfelelő próbatesten megtörténhet a szimuláció. A kapott mintán további mérések, vizsgálatok végezhetők. A számítógépes és fizikai szimuláció során kapott eredmények megegyezése megalapozhatja a félüzemi vagy üzemi kísérletek biztonságos végrehajtását.³

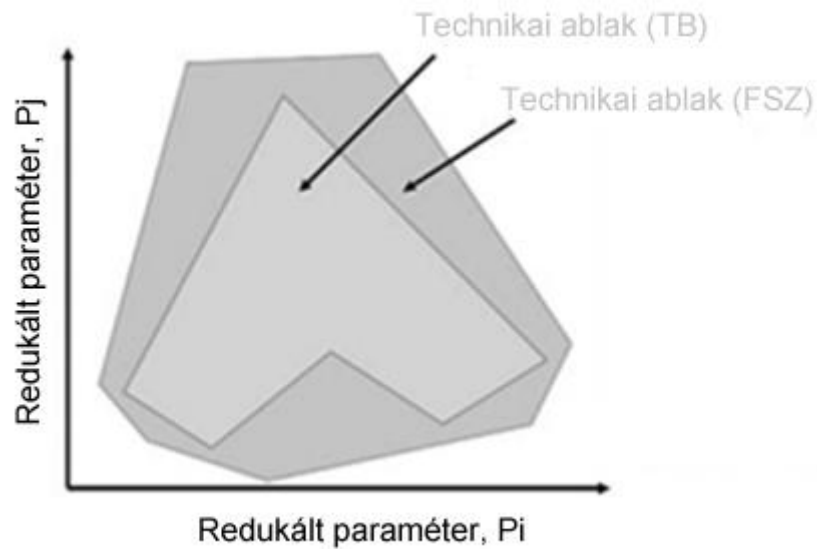
Hogy melyik módszer milyen mértékben járul hozzá egy terület fejlesztéséhez, vizsgáljuk meg technikai ablakukat külön-külön egy adott termelő berendezés technikai ablakával összevetve.



9. ábra - A matematikai modellezés (MM) technikai ablaka és ennek helyzete egy ipari termelőberendezés (TB) technikai ablakához képest³

A matematikai szimuláció technikai ablaka a legszélesebb, mert a határokat csak a figyelembe vett természettudományi törvények érvényessége szabja meg. Ez nagy

előnye a számítógépes modellezésnek, ugyanis így a termelőberendezés vagy a fizikai szimulátor veszélyeztetése nélkül próbálhatók ki folyamatok.



10. ábra - A fizikai szimulátor (FSZ) technikai ablaka és annak helyzete egy ipari termelőberendezés (TB) technikai ablakához képest³

4. A MELEGREPEDÉKENYSÉG PROBLÉMÁJA

4.1 Repedésképződés hegesztéskor

A repedésképződési folyamatok ismerete, a repedékenység vizsgálatai alapvetőek a hegesztett szerkezetek töréses tönkremeneteleinek megelőzésében. A repedés a legszélsőségesebb fajtája a hegesztési hibáknak, ami miatt előfordulhat, hogy a teljes varratot el kell távolítani. A repedések nem csak csökkentik a szerkezet szilárdságát azáltal, hogy csökken a varrat keresztmetszete, hanem könnyen terjednek is, különösen dinamikus terhelés, vagy alacsony üzemi hőmérséklet hatására.

Hegesztéskor a helyi felhevülés következtében jelentős alakváltozás jön létre. A hegesztési hőfolyamat hatására az A_1 és a likvidusz hőmérséklet fölé hevült övezetek lehűléskor időben változó alakváltozási képességűek. Ha az alakváltozási képesség kisebb, mint a létrejövő alakváltozás, repedés keletkezik. A repedések előfordulhatnak a felszín alatt és felett egyaránt, valamint a hőhatásövezetben, a varratban, a varrattal párhuzamos és a varratra merőleges irányban is.

Keletkezésüknek folyamatától függően megkülönböztethetünk melegrepedéseket, hegesztési hőfolyamatban végbemenő fázisátalakulással és a diffúzióképes hidrogén hatásával összefüggő hideg repedéseket, teraszos repedéseket és hőkezelési vagy újrahevítési repedéseket.¹²

Mivel a dolgozatban bemutatott vizsgálatok a melegrepedékenység tanulmányozásában játszanak fontos szerepet, ezért ezt a repedéstípust célszerű részletesen bemutatni.

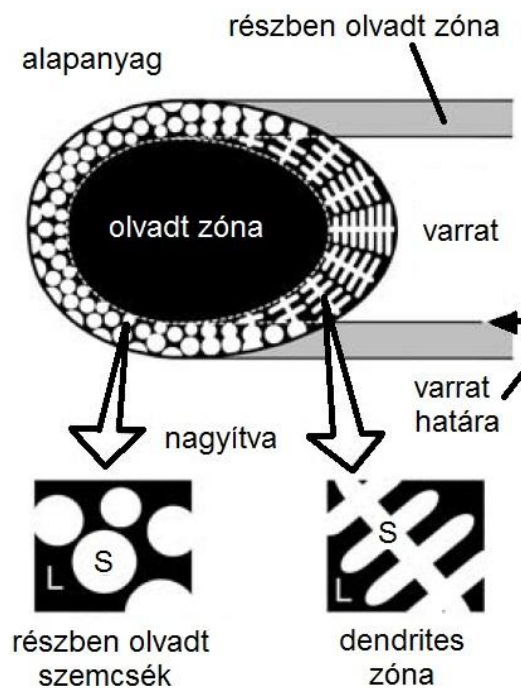
4.2 A melegrepedések

A melegrepedés átfogó fogalom olyan repedési jelenségekről, amelyek kis olvadáspontú anyag jelenlétében a szemcsehatárokon, nagy hőmérsékleten, a hegesztési folyamat során keletkezhetnek. A melegrepedések keletkezésük módja szerint lehetnek kristályosodási vagy likvációs repedések.¹²

A hegesztési folyamat során a már dermedésnek indult, félig olvadt zónában keletkezhetnek a likvációs repedések. Ötvözetek hegesztésekor az olvadt zónát félig

megszilárdult területek veszik körül. A hegesztett fém likvidusz hőmérsékletének megfelelő övezetet tekintjük az olvadt zóna határának. A 11. ábra mutatja be, hogy a haladási irány szerint az olvadt zóna mögött található a dermedésben lévő fém zónája, mely szilárd dendriteket (S) és interdendrikus, vagyis dendrit közötti olvadt anyagot (L) tartalmaz. E zóna mögött pedig a már teljesen megszilárdult anyag, maga a varrat található.¹³

Az olvadt zóna előtti és két oldalán lévő terület szintén félig dermedt, mely részben megolvadt alapanyag-szemcsékből és szemcseközi folyékony fémből áll. Itt a hőmérséklet meghaladja az alapanyag eutektikus hőmérsékletét.



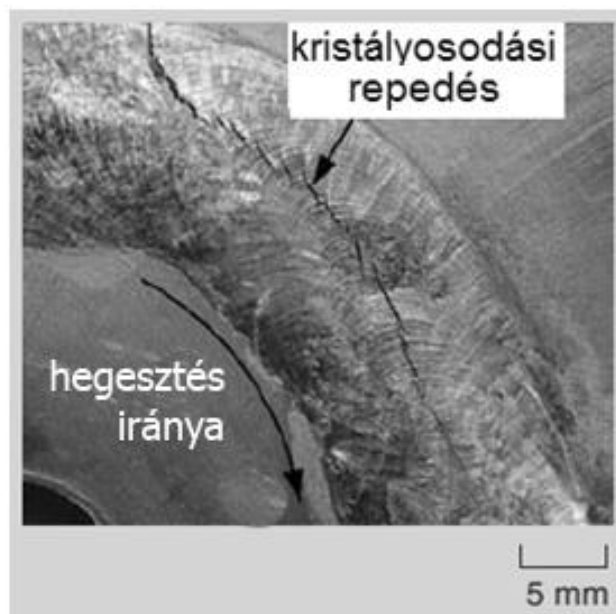
11. ábra - Olvadt zóna és környezete, hőhatásövezet¹³

A félig olvadt szemcséket követően visszafelé haladva pedig a dermedés alatt álló félig olvadt anyagot láthatjuk, melyet részben megolvadt zónának nevezünk. A 12. ábra szemlélteti, hogy a kristályosodási repedések többnyire a kötés középvonala mentén helyezkednek el, ezzel szemben a likvációs repedések a varrat külső határán, a hőhatásövezetben fordulnak elő.¹³

4.2.1 A kristályosodási repedés

A kristályosodási repedés szemcséközi és a töretfelület gyakran mutat dendrites alakzatot a dermedt varratban. Ez a két tulajdonság arra enged következtetni, hogy ez a repedéstípus a dermedés végső stádiumában jelenik meg, ahol a dendritek csaknem teljesen a szemcsék közé nőnek, melyek el vannak választva egymástól, ugyanis kis mennyiségben jelen lévő folyékony fémről álló folyadékfilm veszi körbe a szemcsehatárokat. Ilyenkor a varrat még gyenge és így hajlamos a húzófeszültség hatására bekövetkező repedésre.¹³

Számos elmélet született a kristályosodási repedés magyarázatára. J.C. Borland szerint lényegében három teória létezik, a zsugorodási törékenységi, az alakváltozási és egy általánosított elmélet, mely ez előző kettő lényeges gondolatait tartalmazza.¹⁴ Az általános elmélet úgy tartja, kristályosodási repedés akkor jelenik meg, ha folyadékfilm választja el a szemcséket és a helyi húzófeszültség meghaladja az anyag repedéssel szembeni ellenállását.¹² Ismert továbbá, hogy kristályosodási repedésre azok az acélok érzékenyek, amelyeknek az alakváltozó képességük kisebb, mint 15%.



12. ábra - Kristályosodási repedés körvarratban¹³

A kristályosodási repedés megelőzésének módjai a varrat kémiai összetételének, szemcseszerkezetének és a hegesztés körülményeinek módosítása. Ausztenites

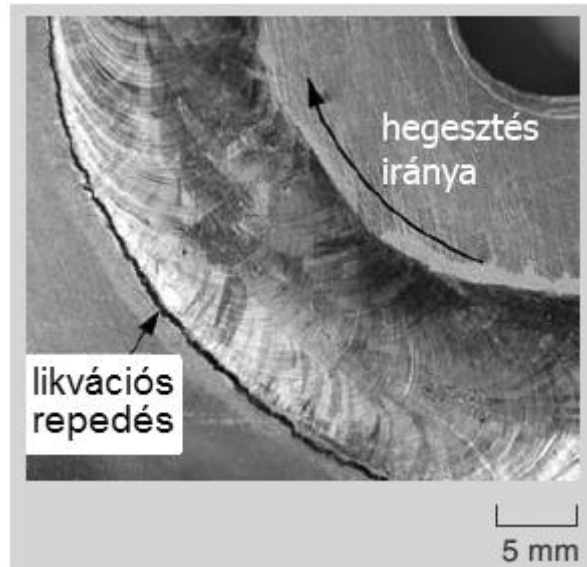
rozsdamentes acélok hegesztésekor a kristályosodási repedések keletkezését leginkább úgy kerülhetjük el, ha a kötés ferrit tartalma 5-10% közé esik. Szénacélok és mikroötvözött acélok esetében olyan kémiai összetételt célszerű választani, melyben a varrat Mn/S aránya kellően magas. Ennek az arálynak a növelése elősegíti a MnS képződést az FeS vegyülettel szemben. A MnS magas olvadáspontja és gömbölyű szerkezete miatt a kén így kevésbé káros hatású. Relatív alacsony karbontartalom mellett a kristályosodási repedékenységet tehát csökkenthetjük a Mn/S arány növelésével, azonban a 0,2-0,3% karbontartalom fölött ezen arány növelése már hatástalan. Sok esetben a varrat karbontartalmának csökkentése, amennyiben megengedhető, sokkal hatékonyabb megoldás.

4.2.2 A likvációs repedés

A likvációs repedést, melyet a 13. ábra szemléltet, egyaránt nevezik varratszéli vagy hőhatásövezet repedésnek is. A likvációs repedés szintén szemcseközi, viszont ebben az esetben a töretfelület nem mutat dendrites szerkezetet. Folyadékfázis jelenléte a szemcseközi töret felületen nyilvánvalónak tűnhet, azonban nem minden esetben az. Likvációs repedés a varrat részben megolvadt zónájában keletkezik, mivel a hőmérséklet az eutektikus hőmérsékletet meghaladja. Ez a terület közvetlenül a varrat külső részén található. A szemcsehatárok mentén, vagy a kár a szemcséken belül is keletkezik.

A részben megolvadt zóna likvációs repedésérzékenységére hatással lehet a likváció mértéke, a szemcseszerkezet, a melegalakíthatóság és a varrat zsugorodása. Minél nagyobb a likváció mértéke, vagyis az olvadt fázis jelenléte, annál nagyobb eséllyel jelenhet meg likvációs repedés. A folyadék fázis mennyisége függ az anyag olvadákonyságától és a hőhatás mértékétől. A hőhatás csökkentésével csökkent a részben olvadt zóna mérete, ezáltal a likváció mértéke is. Alacsonyabb hőhatás érhető el, ha több rétegű hegesztést, elektronsugaras vagy wolfram védőgázos ívhegesztést alkalmazunk.¹² A bór, réz, molibdén, volfrám, titán, alumínium, szilícium és vanádium ötvözők jelenléte a folyékony fémekben csökkenti a folyékony és a szilárd fázis közötti

oldódási energiát, ezért a folyékony fém elnyelődik a szilárd fázis határán. A hőhatásövezetre ható húzófeszültség szintén elősegítheti ezt a folyamatot.



13. ábra - Likvációs repedés körvarratban¹³

A likvációs repedésképződés szintén a varrat kémiai összetételének, a hegesztési körülményeknek szabályozásával és az alapanyag helyes megválasztásával előzhető meg. A varrat összetétele javítható a hozaganyag és a hígítási arány változtatásával. A részben olvadt zóna likvációs repedésérzékenysége a húzófeszültségek csökkentése szintén megoldás. Az alapanyag megválasztásakor fontos tényező lehet a kén- és foszfortartalom, melyek csökkentik a dermedési hőmérséklettartományt.¹³

A melegrepedések veszélye fokozott a primer ausztenites dermedésű ausztenites rozsdamentes acélok esetében. Magas nitrogéntartalmú rozsdamentes acélok hajlamosak primer ausztenit megjelenésével dermedni a nitrogén ausztenit képző hatásának köszönhetően. Másrésről, a modern hegesztési eljárásoknál, mint például a lézerhegesztés, előre jelezhető az ausztenites rozsdamentes acélok növekvő repedési hajlama nagy haladási sebességnél.

5. HEGESZTHETŐSÉGI, MELEGREPEDÉKENYSÉGI VIZSGÁLATOK

Mivel egy adott anyag hegeszthetőségét számos tényező befolyásolja, ezért nem határozható meg egyetlen mérőszámmal. Ezeket a tényezőket külön-külön kell vizsgálni, majd az eredményeket összevetve következtetést levonni. A hegeszthetőség megítélése tehát rendkívül összetett feladat. Ismert számos összefüggés, technológiai vizsgálatok és próbák, valamint a számítógépes szimuláció is rendelkezésre áll. A dolgozat egyik célja bemutatni, hogyan bővül ezen eszközök köre a fizikai szimuláció lehetőségeivel. Az elvégzett vizsgálatok során meghatározásra került az adott anyagminőség zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklete, valamint egy hegesztés szimuláció is lezajlott, mely során a hegesztés hőciklus-görbéjének hevítési és hűlési szakaszai kaphatók eredményül. Mindezek a melegrepedés-képződés problémakörének tanulmányozásához nyújtanak nélkülözhetetlen információkat.

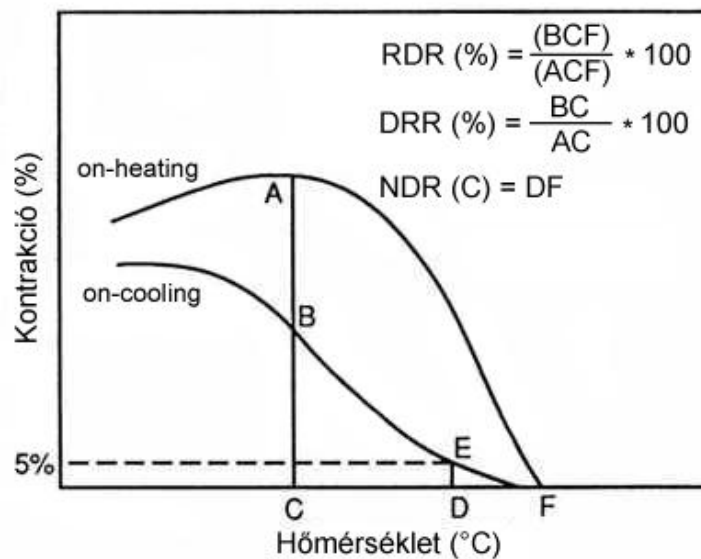
5.1 A vizsgálatok lényege

A korábban leírtak alapján a melegrepedésekről tudjuk, hogy hegesztés után, hűlés közben jelentkeznek, mikor az adott ötvözet rugalmassága még nem elég ahhoz, hogy ellensúlyozni tudja a zsugorodás keltette húzóerőt. A melegrepedékenységi vizsgálatoknak tartalmazniuk kell olyan szakítóvizsgálato(ka)t, mely(ek) feltételei és paraméterei megegyeznek a hegesztés során tapasztaltakkal. A Gleeble szimulátorok képesek a hegesztési hőciklus reprodukálására és a kismértékű húzófeszültség előállítására, méghozzá mindezt szabályozható körülmények között. E célnak megfelelő vizsgálatok a hevített és hűlésben lévő próbatesteken végzett szakítóvizsgálatok, melyek során megállapításra kerül a melegalakíthatóság a próbatestek kontrakció értékeiből számítva.¹⁵

A vizsgálatok során a szobahőmérséklettől az olvadáspontig haladva az ötvözet melegalakíthatósága a vizsgálati hőmérséklet emelkedésével fokozatosan növekszik,

majd mielőtt elérné az olvadáspontot, az alakíthatóság hirtelen a közel maximumról nullára esik. Azt a hőmérsékletet, amelyen ez bekövetkezik, zérus alakíthatósági hőmérsékletnek (NDT, nil-ductility temperature) nevezzük. Ettől a hőmérséklettől valamelyest feljebb található a zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (NST, nil-strength temperature), melyen az anyag kismértékű deformáció vagy a szemcseközi folyékony fázis hatására elveszíti szilárdságát. A legtöbb ötvözet tényleges, fizikailag mérhető olvadási hőmérséklete (T_L) az NST értéknél magasabb. Az olvadásponttól vagy az NST hőmérsékletéről való lehűléskor az NDT értéknél az anyag még nem nyeri vissza teljes mértékben az alakíthatóságát. Ez az úgy nevezett helyreállt alakíthatóság hőmérsékletén (DRT, ductility recovery temperature) elérésekor következik be. Az NST és a DRT értékek közötti tartományt tekintjük a törékeny hőmérsékleti tartománynak (BTR, brittle temperature range).¹⁵

E tartomány nagysága a melegrepedés-érzékenység egy tágabb kritériumaként értelmezhető és alkalmazható, ennél közelebbi kritérium pedig abból adódik, ha összehasonlítjuk az alakíthatóság hűlés közbeni helyreállásának sebességét az alakíthatóság hevítési közbeni csökkenésének sebességével. Ehhez referenciapontként az alakíthatóság hevítési (on-heating) görbén található maximumát vesszük, és a hevítési (on-heating) és hűlés közbeni (on-cooling) görbék alatti területeket összehasonlítjuk. Ezután tetszőlegesen kijelöljük az 5% kontrakció értéket, mint az alakíthatóság helyreállásának pontját és összehasonlítjuk a hevítés és hűlés közbeni melegalakíthatósági görbéket, a zérus-alakíthatósági tartományt (NDR, nil-ductility range, $NDR=BTR$), kiszámoljuk az alakíthatóság helyreállásának mértékét (DRR, ductility recovery rate) és az alakíthatóság helyreállásának arányát (RDR, ratio of ductility recovery). Mindezt a 14. ábra szemlélteti.

14. ábra – Melegalakíthatósági görbék kiértékelése¹⁵

A fenti értékek és összefüggések ismeretében pontosan jellemezhető egy anyag melegrepedés-érzékenysége.

5.2 A vizsgált anyagminőség

A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérsékletet meghatározó, valamint a melegsakító vizsgálatokra egyaránt az S960QL jelű anyagminőségen került sor, mely egy alacsonyan ötvözött, finomszemcsés, nagy szilárdságú (HSLA) acélt jelöl, mely kiválóan ellenáll a feszültségnek és az abráziónak.¹⁶

A HSLA acélok szilárdsága $R_m=400-1000 \text{ N/mm}^2$, jól hegeszthetők, jól alakíthatók, a ridegtöréssel szembeni ellenállásuk is kiváló. Kis karbontartalmúak ($C=0,1-0,2\%$), ötvözői közül csak mangánt tartalmaznak jelentősebb mennyiségben ($Mn=1,0-1,7\%$). Mikroötvözői pedig a vanádium, nióbium, titán, alumínium és nitrogén. Ezek együttes mennyisége nem haladhatja meg a $0,12\%$ -ot, ugyanis akkor számít mikroötvözöttnek egy acél, ha ötvözői össz mennyisége $0,15\%$ alá esik.¹⁷ Az alacsonyan ötvözött acélokat főként híd szerkezetekben, járművekben, daruk vagy hajók esetében alkalmazzák.

15. ábra - S960QL acélból készült hegesztett szerkezetek¹⁶

Az anyag természetének köszönhetően elterjedten alkalmazzák a bányászatban, nagy teherbírású szállítóberendezéseknél, és emelésnél, ahol a nagy terhelés és az anyagok leromlása miatti túlzott kopás mindennapos probléma.¹⁶

Az anyag kémiai összetételét a 1. táblázat mutatja.

Az S960QL jelű HSLA acél kémiai összetétele, tömeg%:

1. táblázat

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,17	0,41	1,42	0,009	0,0004	0,0043	0,002	0,63	0,03	0,46	0,023	0,04	0,005	0,12	0,15

Mechanikai tulajdonságai:

- $R_y=1007$ MPa
- $R_m=1045$ MPa
- $A_5=16,0\%$.

5.3 A vizsgálóberendezés, a Gleeble 3500 fizikai szimulátor bemutatása

A Gleeble 3500 egy teljes körűen integrált, számítógépes adatgyűjtő- és feldolgozó egységgel ellátott termo-mechanikus vizsgáló rendszer. 1995-ben mutatta be a DSI mint első, harmadik generációs szimulációs berendezést, melyek esetében a vezérlés már digitális elektronikával, zártkörűen valósul meg.⁶ Két fő része a termikus és a

mechanikus rendszer, továbbá speciális feladatokhoz kiegészítő egységek állnak rendelkezésre, melyek opcionálisan megrendelhetők a gyártótól.¹⁸



16. ábra - A Gleeble 3500 termo-mechanikus szimulátor a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén

5.3.1 A termikus rendszer

A közvetlen ellenállásfűtéssel akár $10000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ hevítési sebesség is elérhető. A próbatest felszínén egyenletes hőmérséklet eloszlás valószínűsíthető és nagy pontossággal állandó hőmérsékleten tartható hosszabb ideig. Így képes az egyensúlyi hőmérsékletek megtartására. Nagy hővezetőségű befogókön keresztül történik a munkadarab hevítése, eközben a befogófejek hidegek maradnak. Ennek megfelelően a próbatest közepén egyenletes hőmérsékletű zóna alakul ki. Továbbá nagy hővezető képességük miatt a rendszer képes nagy hűtési sebességek alkalmazására is. Termoelem vagy opcionálisan választható infravörös pirométer nyújt visszajelzést a próbatest hőmérsékletéről. Egy szintén opcionálisan rendelhető edzést megvalósító rendszer pedig képes akár $10000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ hűtési sebességre is. A Gleeble ezen paramétereinek köszönhetően 3-10-szer gyorsabban végezhetők termikus kísérletek, mint a kemencés, hagyományos módszerrel.⁷

5.3.2 A mechanikus rendszer

A Gleeble 3500 mechanikus rendszere egy komplett, teljes körűen integrált hidraulikus szervó-rendszer, mely képes akár 100 kN statikus húzó- vagy nyomóterhelést gyakorolni, illetve akár 1000 mm/sec alakítási sebesség is elérhető. Visszajelző adatokat érintésmentes lézeres nyúlásmérők (extenzometer), erőmérő cellák és elmozdulás érzékelők, LDVT átalakítók stb. biztosítanak. A mechanikai rendszert úgy tervezték, hogy a folyamat közben az üzemeltető vagy a megírt program bármilyen gyakorisággal át tud váltani egyik szabályozási módról a másikra. Ez a képesség biztosítja azt a sokoldalúságot, amely a termo-mechanikai folyamatok szimulálásához szükséges. A rendelkezésre álló vezérlési módok magukban foglalják a következőket: dugattyú elmozdulás, erő, számos extenzometer, valódi feszültség, valódi nyúlás, mérnöki feszültség, mérnöki nyúlás.

A szimulátor lelkének is tekinthető a Series 3 Digital Control System, mely egy harmadik generációjú digitális vezérlő rendszer, ami minden szükséges jelet biztosít a termikus és mechanikus vizsgálatok változóinak egyidejű vezérléséhez a digitális zártkörű termikus és mechanikus szervó rendszerek segítségével. A Gleeble 3500 berendezés teljes mértékben működtethető kizárólag számítógép által vagy kizárólag manuálisan a kezelőfelület segítségével, továbbá a két lehetőség kombinációjával is, mely igazán sokoldalúvá teszi a szimulátort az anyagvizsgálatok folyamán. A számítógép vezérlés Windows alapú munkaállomással és a kontroll konzolban található nagy teljesítményű beépített processzorral valósul meg. A Windows munkaállomás rugalmas, multi-tasking grafikus felhasználói felületet kínál a szimulációs programok megírásához és az eredmények elemzéséhez, valamint jelentések és prezentációk készítését is támogatja.¹⁸

A beépített processzor feldolgozza a vizsgálati és szimulációs programokat és a Windows program segítségével összegyűjti az adatokat. A rendszer lehetővé teszi, hogy a felhasználó a tesztek futása alatt már elkészíthesse akár a következő vizsgálat programját vagy elemezzen más adatokat, ez alatt pedig végrehajtja az előzőleg megírt vizsgálati vagy szimulációs programot. A rendszer képes 2000 minta/sec sebességgel visszacsatolási jelek küldésére.

Vizsgálhatók a hideg- és melegrepedési hajlam, újrahevítési repedési hajlam. Reprodukálhatjuk azokat a környezeti feltételeket, amelyekben a hegesztett kötés „üzemel”, valamint korróziós közegben is vizsgálhatjuk a viselkedését. Képes nagy mennyiségben homogén, egyetlen szövetszerkezettel rendelkező anyagminta előállítására.¹⁸

5.4 A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (NST) vizsgálata

A vizsgálatok első részének célja a zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (Nil-Strength Temperature = NST) meghatározása, mely tehát az a hőmérséklet, amelynél a próbatest a legkisebb ráadott terhelés hatására elszakad. Az acélok NST hőmérsékletének pontos, reprodukálható meghatározására a legtöbb anyagvizsgáló berendezés nem alkalmas. Ennek oka kettős: egyrészt az acél olvadáspontjához közeli hőmérsékletre kell hevíteni a próbatestet, jól szabályozható módon, a vizsgálati hőmérséklet közelében kis (1-2 K/s) felfűtési sebességgel, másrészt a berendezésnek biztosítania kell a minimálisan előfeszített állapotot, aminek állandó értéken tartása, a hőtágulás miatt komoly szabályozástechnikai probléma.⁴

A Gleeble 3500 rendkívül gyors lefolyású fémtani folyamatok fizikai szimulációjára kifejlesztett berendezés. A vizsgálatok során általában a nagyteljesítményű hidraulikus rendszer hozza létre a mechanikus feszültséget az próbatestben. A NST meghatározásához azonban egy speciális pneumatikus rendszert építettek be a rendszerbe, amely kis, a NST meghatározásához megkövetelt minimális terhelést is képes kilengések nélkül, állandó értéken tartani.

A legtöbb Gleeble rendszerhez elérhető NST vizsgálati befogók (NST Testing Jaws) képesek megteremteni a feltételeket ahhoz, hogy pontos, reprodukálható NST értékek szülessenek. A befogók hasznosnak bizonyulnak olyan más termikus törésvizsgálati típusoknál, ahol lényeges, hogy a befogók redukálni tudják a hőtágulás mechanikai hatásait a próbatesten.¹⁹

A Dynamic Systems kifejlesztett egy eljárást egy anyag NST értékének meghatározására. Ennek használata biztosítja, hogy minden NST adat

összehasonlítható. A terhelésnek minél kisebbnek kell lennie, ám a túl kicsi előterhelés a vizsgálat reprodukálhatóságát rontja, a meghatározott NST érték bizonytalanságát növeli. Tekintettel ezekre és a próbatest geometriájára, a vizsgálatokhoz 80 N-os előterhelés került alkalmazásra. A használt erő mennyisége kisebb értékre is állítható, ha a vizsgálat megismételhetősége még egy elfogadható tartományon belül van. Kisebb húzóerő alapvetően az adatok nagyobb szórását eredményezi. Néhány anyagnak széles a folyékony/szilárd régiója. Mikor a feszültség túl kicsi, az NST változhat e régió nagyságától függően.

5.4.1 Az NST értékek felhasználása

Az anyagfejlesztő mérnökök egyik fő feladata hogy megelőzzék a hengerlés, öntés, folyamatos öntés és esetünkben a hegesztés során előforduló repedéskeletkezést. A repedés megjelenésének lehetősége nagymértékben csökkenthető, ha az NST és NDT hőmérsékletek közötti különbség kevesebb, mint 20°C. E két érték közötti hőmérséklet tartományban az anyag valamelyest visszanyeri szilárdságát, de ez még nem elegendő bármilyen jelentősebb terheléssel szembeni ellenálláshoz. Mikor ez az alacsony szilárdsági érték az anyag hűlése folytán bekövetkező zsugorodással párosul, repedések keletkeznek.

A legjobb mód, hogy megakadályozzuk az így keletkező repedéseket, ha csökkentjük a különbséget az NST és NDT között. Ezt gyakran úgy érik el, hogy megváltoztatják egy ötvözet összetételét mindaddig, amíg kielégítő eredmény nem érhető el. A 10-30°C-os NST-NDT különbség általában elfogadható, de a repedéskeletkezés veszélye e különbség növekedésével együtt növekszik. Ha a különbség meghaladja a 150°C-ot, garantáltan jelentkeznék repedések. Az ötvözők és arányuk helyes megválasztásával az anyagfejlesztő mérnökök kifejleszthetnek olyan anyagokat, amelyeknél minimális a repedéskeletkezés veszélye.

A legtöbb szabványos méretű termikus/mechanikus vizsgáló berendezés képtelen a pontos NST értékhez szükséges nagyon kis terhelési erő kifejtésére, amit a próbatest hőtágulásához is hozzá kell igazítani. Ennek oka, hogy az erő, ami a befogóban

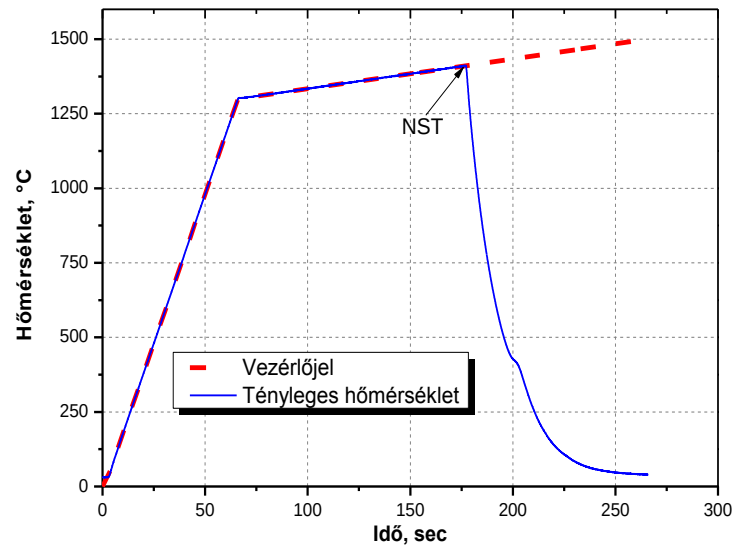
keletkező csapágysúrlódás legyőzéséhez szükséges, nagymértékben meghaladja az NST vizsgálatkor alkalmazott erőt. A hagyományos rendszerek a próbatest hőtágulása keltette nyomóerő kompenzálására szintén képtelenek.

Az NST vizsgálati befogók kiküszöbölik ezeket a problémákat miközben továbbra is megtartják a Gleeble rendszer előnyeit. Az NST befogók a kis erő kifejtésű (low force jaw set) befogószett egy variációi, melyek opcionálisan elérhetők a Gleeble 2000 és 3000 rendszerekhez. Egy légdugattyú állítja elő az egyenletes húzóerőt. Könnyű befogófejek és egyenes görgő csapágysúrlódás gondoskodik a minimális súrlódásról.¹⁹

5.4.2 Az NST vizsgálat menete és eredményei

A vizsgálat sima, hengeres próbatesten történik, mely 6 mm átmérőjű, hossza 80 mm, a vizsgálati hossz pedig 25 mm. A NST érték a vizsgált anyag szolidusz hőmérsékletéhez közel esik, ezért a pontosabb megállapítás érdekében a szolidusz hőmérséklet előtt a felütsési sebességnek minél kisebbnek kell lennie. Ennek megfelelően a vizsgálat során két felfütsési sebesség alkalmazandó.

A vizsgálat kezdeti szakaszában, a szobahőmérséklettől haladva a szolidusz hőmérsékletnél 100-150 °C-kal alacsonyabb értékig, (jelen esetben 1200 °C-ig) viszonylag nagy felfütsési sebesség használható (20 °C/s), ezt követően azonban ezt le kell csökkenteni 1-2 °C/s sebességre. Az 1. diagram az idő függvényében ábrázolja a vezérlőjelet és a próbatesten mért hőmérsékletet, mely a próbatestre felhegesztett termoelemek segítségével került rögzítésre.



1. diagram - A vezérlőjel és a próbatesten mért tényleges hőmérséklet⁴

A vezérlőjel és a tényleges hőmérséklet görbéje tökéletesen együtt halad, mely bizonyítja a rendszer szabályozásának kiváló működését. A próbatest elszakadásakor a két görbe elválik, az ehhez a pillanathoz tartozó hőmérséklet tehát a vizsgált anyag NST hőmérséklete. Négy ugyanazon feltételek és paraméterek mellett elvégzett vizsgálat után a kapott NST értékekből számolható egy átlag érték. A négy vizsgálat eredményét, valamint a statisztikai adatokat a 2. táblázat tartalmazza.

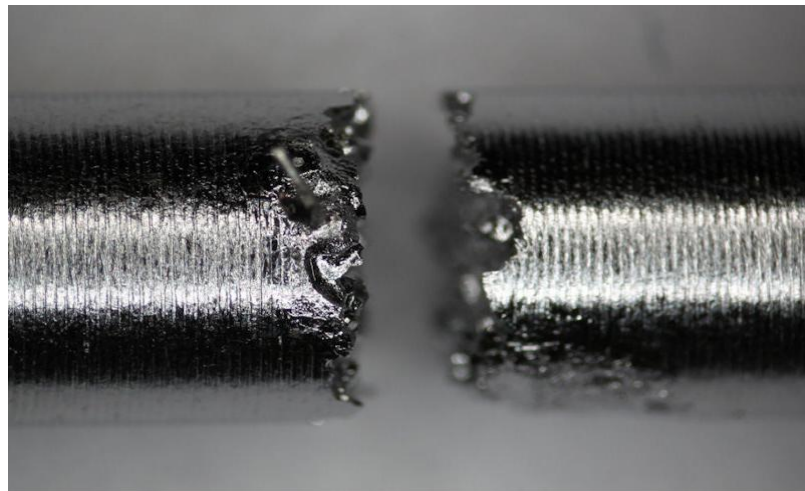
A vizsgálatokból meghatározott NST értékek és statisztikai jellemzők:

2. táblázat

Jellemző	Érték
NST-No.1	1434,0 °C
NST-No.2	1358,3 °C
NST-No.3	1412,5 °C
NST-No.4	1410,4 °C
Átlag	1403,8 °C

Szórás	32,2 °C
Szórási együttható	2,29 %

Az elszakadt próbatestet megvizsgálva látható, hogy a töret kontrakció nélküli, ezüstösen csillogó és a szakadás a szemcsehatárok mentén ment végbe. Mindez a 17. **ábra** és 18. **ábra**án jól látható.



17. ábra - NST próbatest szakadási felülete, oldalnézet



18. ábra - NST próbatest szakadási felülete, felülnézet

5.5 Hegesztés szimuláció, melegsakító vizsgálatok

A vizsgálatsorozat második részében melegsakító vizsgálatokra került sor, melyekkel a hegesztés hőciklus-görbéjének szakaszai határozhatók meg. A vizsgálatok hevített (on-heating) és hevített majd visszahűtött (on-cooling) próbatesteteken történtek.⁴

5.5.1 Az on-heating vizsgálat

Az on-heating vizsgálat során a próbatestet egy adott teszhőmérsékletre felhevítjük, egy előre meghatározott ideig ezen a hőmérsékleten tartjuk, majd egy konstans értékű erőhatással szakadásig húzzuk. Hegesztés témájú tanulmányok esetében a termikus ciklus hevítési sebessége úgy reprodukálendő, hogy az adott teszhőmérsékleten való húzás előtti hőtartás csak nagyon rövid ideig tart, vagy teljesen elmarad.¹⁹

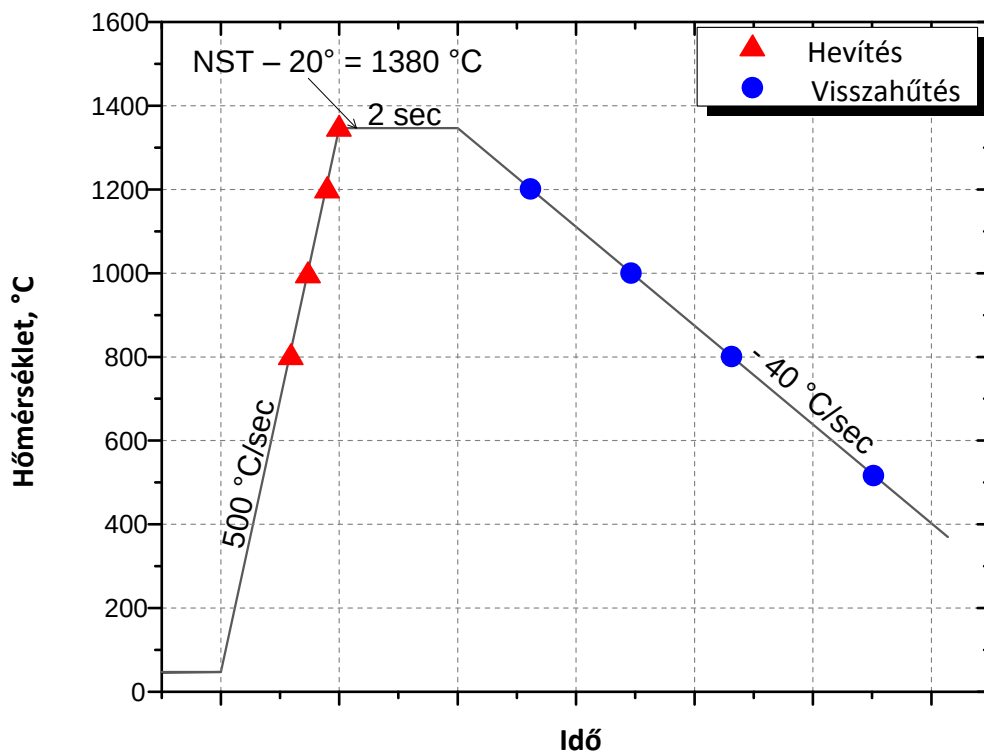
5.5.2 Az on-cooling vizsgálat

E hűlés közbeni melegsakító vizsgálat során a próbatestet egy csúcserőig hevítjük, a hőtartási idő ez esetben is minimális vagy zérus, majd lehűtjük az adott teszhőmérsékletig, ezt követően pedig húzóerő által elszakítjuk.

Mindkét vizsgálat során a próbatestet rézbefogók segítségével rögzítjük, melyek meredekebb termikus gradienst képesek megvalósítani, mint a rozsdamentes acél befogó pofák. A rézbefogók használatával nyert melegsakítási eredmény sokkal közelebb áll a valós folyamatokhoz, különösen hegesztéskor, amikor egy nagy meredekségű termikus gradiens mindig előfordul. A melegsakítási nem csak anyagjellemző, hanem folyamatfüggő tulajdonság is. Ezért mindig a megfelelő termikus gradiens szükséges a jellemzéséhez.¹⁹

5.5.3 A vizsgálatok paraméterei és eredményei

Egy adott anyag esetében a NST meghatározása mindig megelőzi a hevítés és hűlés közbeni szilárdság meghatározását, mivel e vizsgálatok maximális hőmérséklete legalább 20...30 °C-kal az NST alatt kell hogy legyen. Megfigyelték, hogy a csúcshőmérséklet változásával változik a hűlés közbeni szilárdsági görbe. Normál esetben alacsonyabb csúcshőmérsékletekhez alacsonyabb szilárdság tartozik. Az S960QL HSLA acél esetében megállapított NST az előzőek alapján átlag 1403,8 °C volt, ezért 1380 °C-ot választottuk csúcshőmérsékletnek. Esetünkben a hőtartási idő 2 másodperc. Az alkalmazott hőmérséklet-idő diagramot, annak további paramétereit, úgy mint hevítési sebesség, hőtartási idő a csúcshőmérsékleten, hűtési sebesség és a konkrét vizsgálati hőmérsékleteket a 2. diagram mutatja be.⁴



2. diagram - A melegsakító vizsgálatok során alkalmazott hőmérséklet-idő diagram és a konkrét vizsgálati hőmérsékletek⁴

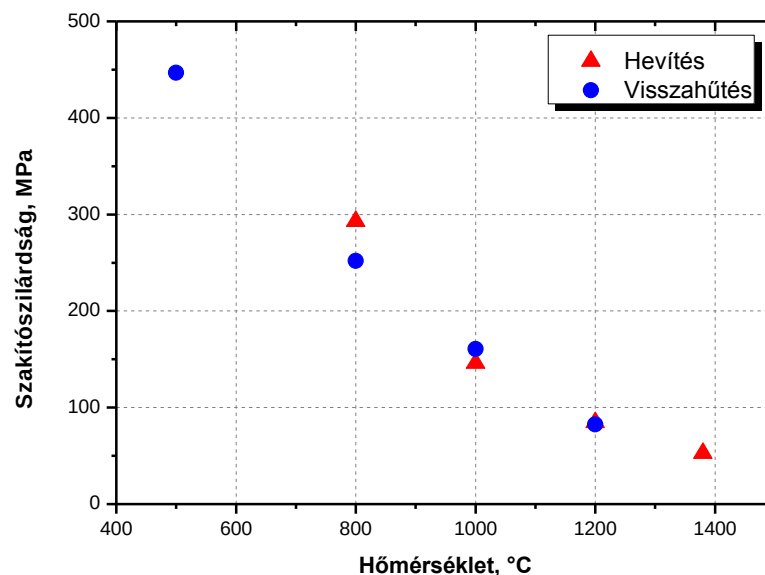
Mindkét vizsgálat négy adott teszhőmérsékleten zajlott, ezeket az értékeket, valamint a meghatározott szakítószilárdság és kontrakció értékeket a 3. táblázat mutatja be.

A melegszakító vizsgálatok konkrét hőmérsékletei és eredményei:

3. táblázat

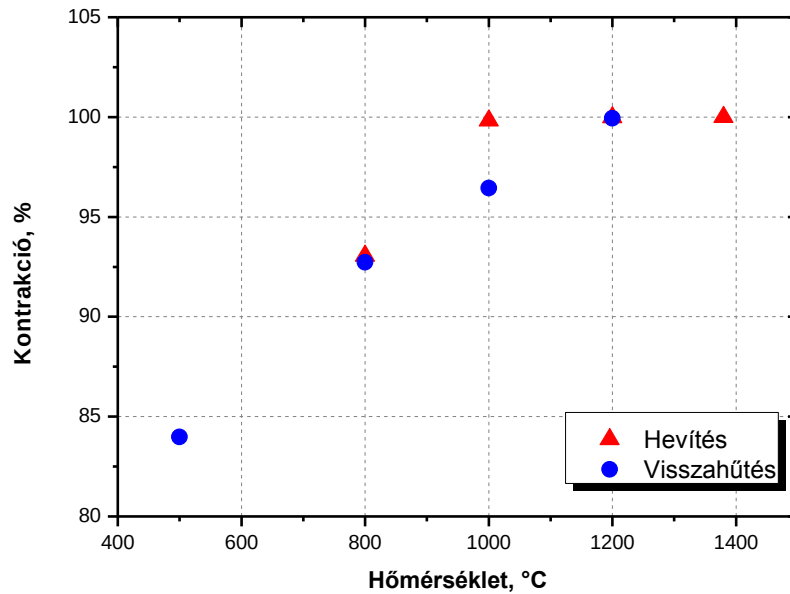
Hőciklus	$T_{\text{vizsg}}, ^\circ\text{C}$	R_m, MPa	Z, %
hevítés	800	292,8	93,05
	1000	146,0	99,82
	1200	84,4	99,99
	1380	52,8	100,0
hevítés-visszahűtés	1200	82,5	99,93
	1000	160,5	96,43
	800	252,0	92,73
	500	446,7	83,98

A szakítószilárdság értékeit a vizsgálati hőmérséklet függvényében a 3. diagram szemlélteti.



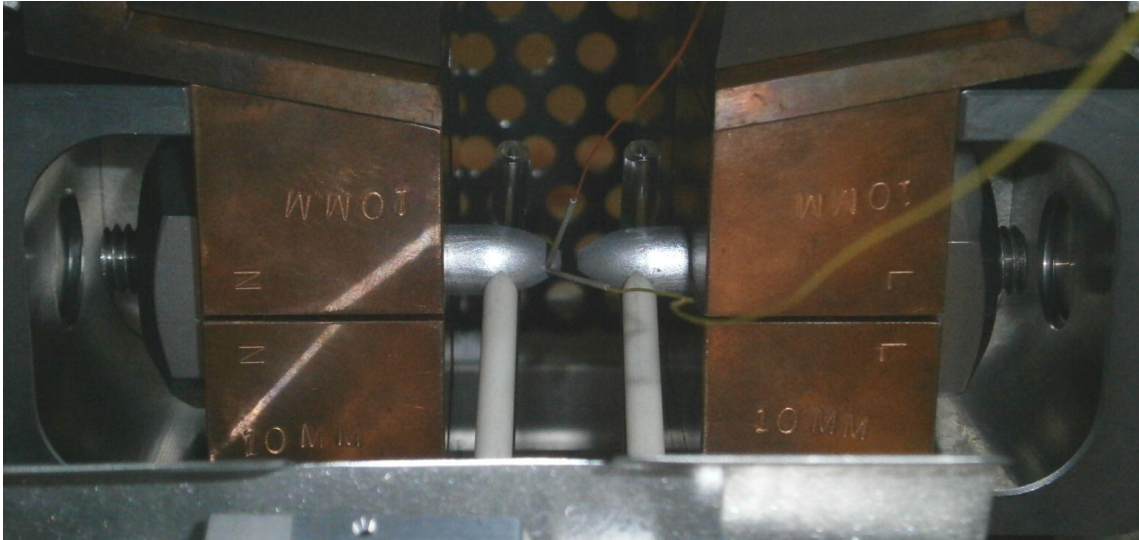
3. diagram - A szakítószilárdság értékek a hőmérséklet függvényében⁴

Az eredményekből pedig megrajzolható a kontrakció a hőmérséklet függvényében diagram.



4. diagram - Kontrakció értékek a hőmérséklet függvényében⁴

A diagramokon megkülönböztethető a hevítés (piros háromszög) és hevítés-visszahűtés (kék korong) során kapott adatok. Az alábbi ábrán látható az egyik próbatest és kontrakciója, melyet, akárcsak a többi próbatest esetében is Abbe-komparátor segítségével került meghatározásra.



19. ábra – A próbatest kontrakciója vizsgálat után, a nagy hővezetésű rézbefogók és a termoelemek

A vizsgálatok sikerességét igazolja, hogy az értékek megfelelőek és a pontsorok összhangban vannak az irodalomban található más tanulmányok eredményeivel.⁴

5.6 További lehetőségek

Több irányvonal is létezik, melyeken elindulva további eredményekre és következtetésekre juthatunk ezen anyag hegeszthetőségét és melegrepedékenységét illetően, ha folytatjuk e vizsgálatokat. Egyrészt változtathatunk

- a hőciklus hevítési és hűtési sebességén,
- szűkíthetjük a teszhőmérsékletek közötti lépcsőket,
- a vizsgálatok ismételhetőségének vizsgálata érdekében, több párhuzamos vizsgálatot végzünk azonos körülményekkel különböző próbatesteken.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen dolgozat a hazánkban újdonságnak számító, a műszaki anyagtudomány terén széles körben alkalmazható fizikai szimuláció lényegének, elméleti hátterének, jelentőségének és gyakorlati alkalmazásainak bemutatása céljából született meg.

Bemutattam kialakulásnak folyamatát és szükségszerűségét, miként bővült további funkciókkal és hogyan formált végül egy összetett, sokoldalú, számos esetben nélkülözhetetlen anyag- és folyamatvizsgálati rendszert. A fizikai szimulációt összehasonlítottam a matematikai modellezéssel, valamint megmutattam, hogyan alkot elválaszthatatlan egységet ez a két, egyre szélesebb körben alkalmazott eszköz.

Bemutatom a hegesztéstechnológiában a hegesztett kötések melegrepedés által bekövetkezett tönkremenetelét valamint a melegrepedés-érzékenység vizsgálatának elméletét, hiszen a XX. század közepén ez a problémakör hívta életre magát a fizikai szimulációt. Részletesen ismertettem a Gleeble 3500 típusú termo-mechanikus szimulátort, melyen a dolgozatban bemutatott vizsgálatok zajlottak. Ezek a vizsgálatok az S960QL nagyszilárdságú acél melegrepedés-érzékenységének meghatározásához szükséges komplett vizsgálatsorozat első lépései lehetnek.

Meghatároztam az S960QL nagyszilárdságú acél zérus szilárdságához tartozó hőmérsékletét, melyet $1403,8 \pm 32,2$ °C-ban állapítottunk meg.

Szabályozott nagyhőmérsékletű hevítés és visszahűtés közben végeztem vizsgálatokat összesen nyolc hőmérsékleten, és megállapítottam az adott hőmérsékleten az anyag szakítószilárdságát és a kontrakcióját.

Az elvégzett vizsgálatok sikeressége biztatóan hat további vizsgálatok tervezésének és kivitelezésének megfontolására. Ehhez elengedhetetlen a berendezés jobb megismerése és a rajta végezhető vizsgálatok megértése. Az erre szánt idő és munka garantáltan kifizetődik a jövőben, egy ilyen, hazánkban újszerű technológia révén a hozzáértő hazai szakemberek keresett partnerek lehetnek eddig elérhetetlennek számító, izgalmas, új projekteken.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A 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 valósul meg.”

Eredetiség nyilatkozat

Alulírott Szűcs Katalin, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy az Újdonság és új tapasztalatok – A fizikai szimuláció megismerése és alkalmazása a hegesztéstechnológiákban című dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2012. november 5.

.....
a hallgató(k) aláírása

A konzulens nyilatkozata

Alulírott Dr. Kuzsella László, a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékének adjunktusa Szűcs Katalin Újdonság és új tapasztalatok – A fizikai szimuláció megismerése és alkalmazása a hegesztéstechnológiákban című TDK dolgozatát beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2012. november. 5.

.....
a konzulens aláírása

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] DSI Dynamic Systems Inc. homepage, Resources/What is Physical Simulation?, <http://gleeble.com/index.php/resources/what-is-physical-simulation.html>
- [2] Verő, B.: *A fizikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban*, ISD Dunaferri Műszaki Gazdasági Közlemények, (2007) XLVII. évfolyam 4. szám (148.) p. 167-172.
- [3] Verő, B.: *A fizikai és matematikai szimuláció helye és szerepe a vaskohászati kutatás-fejlesztésben*, ISD Dunaferri Műszaki Gazdasági Közlemények, (2008) XLVIII. évfolyam 3. szám, p. 114-116.
- [4] Kuzsella L., Lukács J., Szűcs K.: *Fizikai szimulációval végzett vizsgálatok S960QL jelű, nagy szilárdságú acélon*, Gép folyóirat, 2012. október.
- [5] Ferguson, D.; Chen, W.; Bonesteel, T.; Vosburgh J.: *A look at physical simulation of metallurgical processes, past, present and future*; Materials Science and Engineering A 499 (2009), p. 329-332.
- [6] DSI Dynamic Systems Inc. homepage, About us/Company History <http://gleeble.com/index.php/about-us1/company-history.html>
- [7] Farkas P.: *Dermedési, melegalakítási, hidegalakítási, hőkezelési, hegesztési és felületkezelési folyamatok fizikai modellezését ipari gyakorlat által megkövetelt hőmérséklet, alakváltozási ciklusok és alakváltozási sebességek mellett megvalósító, átfolyó árammal és nagy sebességű hidraulikus alakítóegységgel működő berendezés alumíniumipari alkalmazásának irodalmi feltárása és feldolgozása, felhasználási lehetőségeinek bemutatása, valamint kutatás- és kísérlettervezés az Alcoa Kőfém Kft. részére*, DURATT Dunaújváros, K+F tanulmány, (2007)
- [8] Mandziej S. T.: *Physical Simulation of Metallurgical Processes*, Dynamic Systems Inc., 2. – 24. 5. 2007 Hradec nad Moravicí p. 105-106.
- [9] Adonyi Y.: *Heat-Affected Zone Characterization by Physical Simulations*, Welding Journal (October, 2006) p. 42-47.

-
- [10] Páczelt I., Szabó T., Baksa A.: A végeselem módszer alapjai, tananyag, (2007), p. 7-9.
- [11] Roósz A.: *A szerkezeti anyagok jövője – szimulációs módszerek*, Kolozsvár, (2003)
- [12] Baránszky-Jób I.: *Hegesztési kézikönyv*, Műszaki könyvkiadó, Budapest (1985) p. 83-85.
- [13] Kou, S.: *Solidification and liquation cracking issues in welding*, JOM, 2003 June, p. 37.)
- [14] Borland, J.C.: *Welding and Metal Fabrication*, 47 (January/February 1979), pp. 19–29.)
- [15] Mandziej S.T.: *Testing for susceptibility for hot cracking on GleebleTM physical simulator*, Hot Cracking Phenomena in Welds, BAM, Berlin, March 4-5, (2004)
- [16] Garašić I., Ćorić A., Kožuh Z., Samardžić I.: *Occurrence of cold cracking in welding of high-strength S960 QL steel*, Technical Gazette 17, 3(2010) , p. 327-335.
- [17] Tisza M.: *Metallográfia*, Miskolci Egyetem Kiadó (2004), p. 322.
- [18] DSI Dynamic Systems Inc. homepage, Products/3500
<http://gleeble.com/index.php/products/gleeble-3500.html>
- [19] DSI Inc.: *Operation Manual*, Gleeble 3500 User Guide, p. 56-60.