

FIZIKAI SZIMULÁCIÓVAL VÉGZETT VIZSGÁLATOK S960QL JELŰ, NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLON

PHYSICAL SIMULATION TESTS ON S960QL HSLA STEEL

Dr. Kuzsella László*, Dr. Lukács János**, Szűcs Katalin***

ABSTRACT

Physical simulation is a novel way to explore welding processes. The paper introduces the connection between weldability and physical simulation, the Gleeble 3500 thermo – mechanical physical simulator, respectively, and first experiments performed on S960QL high strength steel. Identification of the nil strength temperature (NST), furthermore the results of the hot-tensile tests (on heating and on cooling parts of the welding simulation curve are also investigated) are being introduced. The future approaches of the research are also exposed.

1. BEVEZETÉS

A hegeszthetőség megítélése általánosan és konkrétan egyaránt összetett feladat. Félempirikus és empirikus összefüggések, technológiai vizsgálatok és próbák sokasága, valamint a számítógépes szimuláció eszköztára egyaránt rendelkezésre áll a felvetődő, komplex kérdések megválaszolására. Ez az eszköztár az utóbbi évtizedekben bővült a fizikai szimuláció adta lehetőségekkel. Jelen közleményünk célja, mindezekre tekintettel, kettős: egyrészt röviden szólni a hegeszthetőség és a fizikai szimuláció kapcsolatáról; másrészt bemutatni a tárgykörben végzett első vizsgálatainkat, illetve azok eredményeit.

2. A HEGESZTHETŐSÉG MEGÍTÉLÉSE

A hegeszthetőséggel összefüggő technológiai vizsgálatok és próbák egyidősek a különböző hegesztéstechnológiákkal. Nemcsak a különböző anyagminőségek, hanem a különböző hegesztő eljárások, illetve eljárás változatok is, újabb és újabb vizsgálatok kidolgozását eredményezték [1]. Ezek jellegzetessége a sokszínűség, a korlátok közötti alkalmazhatóság, valamint a korlátozott összehasonlíthatóság.

* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem (ME), Mechanikai Technológiai Tanszék (MTTsz)

** egyetemi tanár, ME, MTTsz

*** BSc hallgató, ME, Gépészmérnöki és Informatikai Kar

Tekintettel a hegeszthetőség összetett problémakörére (anyagminőség, repedésérzékenység, szerkezet stb.) [2, 3], nincs egyetlen olyan vizsgálat vagy próba, amellyel ez a problémakör megítélhető lenne, és annak nincs – nem is lenne – értelme; ebből következően a hegeszthetőség egyetlen vizsgálati mérőszámmal nem is fejezhető ki. A befolyásoló tényezőket külön-külön kell vizsgálni, meghatározott feltételek között, majd a vizsgálatok eredményei birtokában a különböző anyagok rangsorolhatók. Maga a rangsor követelményfüggő, vagyis nem állandó. A tényezők közötti a bonyolult kapcsolatok más tulajdonságokkal általában nem számszerűsíthetők.

A vizsgálatok, illetve próbák mellett, éppen azok korlátainak feloldására, egyre nagyobb hangsúlyt kaptak a félempirikus, illetve empirikus összefüggések [4]. Ezek algoritmizálására, illetve rendszerezésére számos kísérlet történt [5, 6], célozva és biztosítva azok könnyebb összehasonlíthatóságát.

A vizsgálatok, illetve próbák ellentmondásossága legalább kettős. Egyrészt, a valóságos folyamatok csak kis(ebb) darabokon, illetve térfogatokban tudnak lejátszódni, ami azt jelenti, hogy az anyagi és/vagy technológiai mérőszámok meghatározására is kisméretű próbatestek (például [7]) állnak rendelkezésre. Ez a tény a mérés okán mindenképpen csökkenti az eredmények megbízhatóságát. Másrészt, a technológiai vizsgálatok, illetve próbák csak korlátozottan képesek a valós folyamatok visszatükrözésére, átvitt értelemben fizikai szimulálására.

A vizsgálatok és próbák, valamint a különféle összefüggések hiányosságainak egyik feloldási lehetősége, illetve iránya a matematikai (számítógépes) szimuláció [5], amellyel jelen munkában nem foglalkozunk, másik iránya pedig a fizikai szimuláció.

3. A FIZIKAI SZIMULÁCIÓRÓL

A fémiparban alkalmazott fizikai szimulációról az irodalomban a XX. század közepétől találunk említést. A legelső munkák olyan kísérleti berendezésekben készültek, amelyeket a kutatók maguk építettek, saját használatra, a kereskedelmi forgalomban az első fizikai szimulátor az 1950-es évek második felében jelent meg. A hegesztési problémák központi helyet foglaltak el a komplex metallurgiában, különösen az ívhegesztési

folyamat nem volt teljes mértékben érthető. Nem véletlen tehát, hogy a kezdeti kísérletek jórészt 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. Egy olyan technikára volt szükség, amelynek segítségével legalább a hegesztés hőhatásövezete reprodukálhatóvá válik, mérhető szabályozás mellett, és amely képes visszaadni a hőhatásövezet egyes részeit. Ez volt az első fizikai szimulátorok alapvető célja [8].

Az első fizikai szimulációs rendszert, amely kereskedelmi forgalomban is megjelent, az USA-ban gyártották és a *Gleeble 501* nevet kapta. A berendezés a hőhatásövezetek szimulációjára tervezték. Gyors hevítési rendszerrel bírt (8000 K/s) és egy pneumatikus működtetésű terhelő (húzó) rendszere volt, amely állandó sebességgel történő húzást tett lehetővé. Ez a rendszer képes volt húzóvizsgálat elvégzésére „bármely” hőmérsékleten. 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 fizikai szimuláció nem pusztán egy fizikai vizsgálat (mérés), hanem sokkal több annál. Természetesen, a fizikai szimuláció tartalmaz fizikai vizsgálatot (mérést), a legnagyobb különbség a kettő között az, hogy a fizikai szimuláció megpróbálja a valós folyamatokat reprodukálni laboratóriumi körülmények között úgy, hogy az abból kapott eredmények később felhasználhatóak legyenek egy valós probléma megoldása során. Ismert például, hogy viszonylag könnyű egy anyagvizsgálati próbatestet egy kemencében felhevíteni egy névleges hőmérsékletre, majd összenyomni, miközben mérjük annak alakváltozását egy adott hőmérsékleten. Ez egy fizikai vizsgálat, amely, ha helyesen van kivitelezve, akkor reprodukálható eredményeket hoz létre. Azonban ha a vizsgálatot végzők arra is kíváncsiak, hogy a folyamat eredményeként milyen mikroszerkezet jön létre és milyen anyagi jellemzőket kapunk, vagy ha modellezni vagy fejleszteni szeretnék a folyamatot, akkor a folyamat fizikai szimulációjára van szükség [9].

A fizikai szimuláció egy lehetséges meghatározása a következő: a fizikai szimuláció nem más, mint a tényleges és a lehetséges ipari – esetünkben anyagtechnológiai – folyamatok megvalósítása, a valósággal egyező időléptékben és a valóságot relevánsan megközelítő geometriai (térfogati) léptékben.

A szimuláció tárgya az ipari folyamat alapanyaga, azt – mint az ipari folyamat egy térfogatelemét – a szimuláció során az ipari folyamattal egyező hatásoknak tesszük ki. Az ipari folyamatok során – általában – a mechanikai (M), a termikus (T) és a környezeti (K) igénybevételek, illetve hatások nem önállóan, hanem együttesen, de nem szükségszerűen egy időben, fordulnak elő. A fizikai szimuláció a matematikai (numerikus, számítógépes) szimuláció és az ipari folyamat között, egyértelműen az ipari folyamathoz közelebb helyezkedik el. A fizikai szimuláció, illetve a fizikai szimulátorok sajátosságai az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- a fizikai szimulátor nem "kicsinyített" termelő berendezés;
 - a fizikai szimulátor nem (vizsgáló) célberendezés;
 - a fizikai szimuláció mindig valós idejű;
 - a fizikai szimulátorban kezelendő próbadarabokat, próbatesteket érő hatások időbeli változását a megvalósítandó ipari folyamat jellege határozza meg;
 - a fizikai szimulátorban kezelt próbadarabnak, próbatestnek további vizsgálatokra is alkalmasnak kell lennie;
 - a fizikai és a matematikai (számítógépes, numerikus) szimuláció elválaszthatatlan egységet képez [10-12].
- 1979-ben a *Dynamic Systems, Inc. (DSI)* piacra vezette a második generációs számítógépes *Gleeble 1500*-as berendezést. Ezt a berendezést korszerű elektronikával és hidraulikus egységekkel szerelték fel, illetve kiegészítették ellenállás hevítő rendszerrel. 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.

A *Gleeble 3500*-as rendszer egy teljes körűen integrált, digitálisan zártkörűen vezérelt termo-mechanikai vizsgáló rendszer. Felhasználóbarát Windows alapú számítógépes szoftver, nagy teljesítményű processzorral kiegészítve biztosítja a vizsgálatok megtervezését, futtatását, az adatok elemzését mind a termo-mechanikai vizsgálatok, mind pedig a fizikai szimuláció terén. A *Gleeble 3500* termikus egységének közvetlen ellenálláshevítő rendszere különböző sebességekkel képes a minták felhevítésére, egészen 10000 °C/s -ig, illetve képes az egyensúlyi hőmérsékletek megtartására. Nagy hővezető képességű befogók tartják a mintákat, amelyek alkalmassá teszik a rendszert nagy hűtési sebességek alkalmazására. Egy opcionálisan választható edzést megvalósító rendszer akár 10000 °C/s hűtési sebesség elérésére is képes a próbatest felületén. Hőelemek vagy opcionálisan választható infravörös pirométer biztosítja a pontos visszajelzést/ellenőrzést a próbatest hőmérsékletére vonatkozóan. Az egyedülállóan nagy sebességű hevítő módszernek köszönhetően a *Gleeble* rendszer általában 3-10-szer gyorsabban tudja elvégezni a termikus vizsgálatokat, mint egy hagyományos

kemence alapú berendezés. A *Gleeble 3500* mechanikai rendszere egy komplex, teljes körűen integrált hidraulikus szervo-rendszer, amely képes 100 kN statikus erő kifejtésére húzás vagy nyomás esetén; a maximálisan alkalmazható alakítási sebesség pedig 1000 mm/s . *LDVT* átalakítók, erőmérő cella, vagy érintkezésmentes lézer extenzometer biztosítja a mechanikai vizsgálat pontos kivitelezését és ismételhetőségét. A mechanikus rendszer lehetővé teszi az üzemeltető részére, hogy az adott vizsgálat alatt váltson az egyik vezérlési módból a másikra. Ez a képesség biztosítja azt a sokoldalúságot, amely szükséges a termo-mechanikai folyamatok szimulálásához. A rendelkezésre álló vezérlési módok magukban foglalják a következő egységeket: dugattyú elmozdulás, erő, számos extenzometer, valódi feszültség, valódi nyúlás, mérnöki feszültség, mérnöki nyúlás. A *Gleeble 3500*-as rendszer lelke a harmadik generációjú digitális vezérlő rendszer. Ez minden szükséges jelet biztosít a digitális zártkörű termikus és mechanikus szervo rendszerek segítségével, amelyek a termikus és mechanikus vizsgálatok változóinak egyidejű vezérléséhez szükségesek. A rendszer teljes mértékben vezérelhető számítógép segítségével, kézi vezérléssel, vagy bármely megosztásban a kettő között, az adott feladattól függően [9].

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén üzembe helyezett *Gleeble 3500* szimulátor az 1. ábrán látható.



1. ábra. A *Gleeble 3500* termo-mechanikus fizikai szimulátor a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén.

4. VIZSGÁLATOK S960QL ACÉLON

A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet meghatározására, valamint a melegszikítő vizsgálatokra *S960QL* jelű, nagyszilárdságú acélon került sor. Az acél vegyi összetételét az 1. táblázat mutatja be, a legfontosabb mechanikai tulajdonságai pedig a

következők: $R_y = 1007\text{ MPa}$, $R_m = 1045\text{ MPa}$, $A_5 = 16,0\%$.

C	Si	Mn	P	S
0,20	0,80	1,70	0,020	0,010
N	B	Cr	Cu	Mo
0,015	0,0050	1,50	0,50	0,70
Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,06	2,0	0,05	0,12	0,15

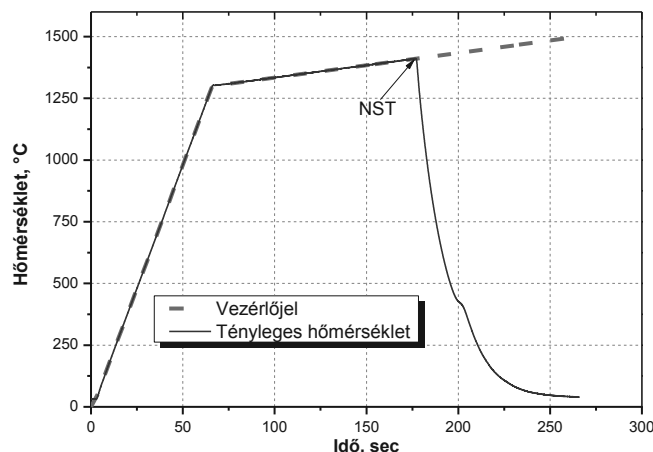
1. táblázat. Az *S960QL* jelű nagyszilárdságú acél vegyi összetétele, tömeg%.

A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (*Nil-Strength Temperature = NST*) 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 ($1-2\text{ K/s}$) felfűtési sebességgel; másrészt a berendezésnek biztosítania kell a minimálisan előfeszített állapotot, aminek állandó értéken tartása, a hőtágulás miatt komoly szabályozástechnikai probléma. A nagy hőmérséklet miatt a vizsgálatokat védőgáz atmoszférában vagy leggyakrabban vákuumban végzik.

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 vizsgálathoz használt sima, hengeres próbatestek átmérője 6 mm , hossza 80 mm , a vizsgálati hossz pedig 25 mm volt. A vizsgálat közbeni előfeszítés célszerű megválasztása során több tényezőt is figyelembe kell venni. A terhelésnek minél kisebbnek kell lennie, ám a túl kis előterhelés a vizsgálat reprodukálhatóságát rontja, a meghatározott *NST* érték bizonytalanságát növeli. Tekintettel ezekre és a próbatest geometriájára, a vizsgálatokhoz 80 N -os előterhelést alkalmaztunk.

A *NST* a vizsgált anyag szolidusz hőmérsékletéhez közeli érték, pontos megállapítása érdekében a szolidusz hőmérséklet előtt a felületi sebességnek minél kisebbnek kell lennie. Ezért a vizsgálat során célszerű két felfűtési sebességet alkalmazni. A vizsgálat kezdeti szakaszában, szobahőmérséklettől a szolidusz hőmérséklet alatt kb. $100-150\text{ }^\circ\text{C}$ -ig (esetünkben $1200\text{ }^\circ\text{C}$ -ig) viszonylag nagy lehet a felfűtési sebesség ($20\text{ }^\circ\text{C/s}$), utána azonban le kell csökkenteni azt ($1-2\text{ }^\circ\text{C/s}$). A 2. ábrán a vezérlő jel és a próbatesten ténylegesen mért hőmérséklet diagramja látható.



2. ábra. A vezérlő jel és a próbatesten mért tényleges hőmérséklet.

A diagramon a vezérlő jel szaggatott, míg a próbatestre erősített termoelemek által szolgáltatott adatokból meghatározott hőmérséklet folytonos vonallal került ábrázolásra. Jól megfigyelhető, hogy a két görbe tökéletesen együtt fut, a berendezés szabályozásának köszönhetően. A két görbe szétválása jelzi a próbatest elszakadását, a hozzá tartozó hőmérséklet a NST.

A vizsgálatokból meghatározott NST értékeket és a négy elemből álló minta statisztikai jellemzőit a 2. táblázatban foglaltuk össze. Annak ellenére, hogy az NST-No.2 jelű próbatesten kapott eredmény lényegesen eltér a többitől, a szórási együttható megfelelőnek nevezhető.

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 %

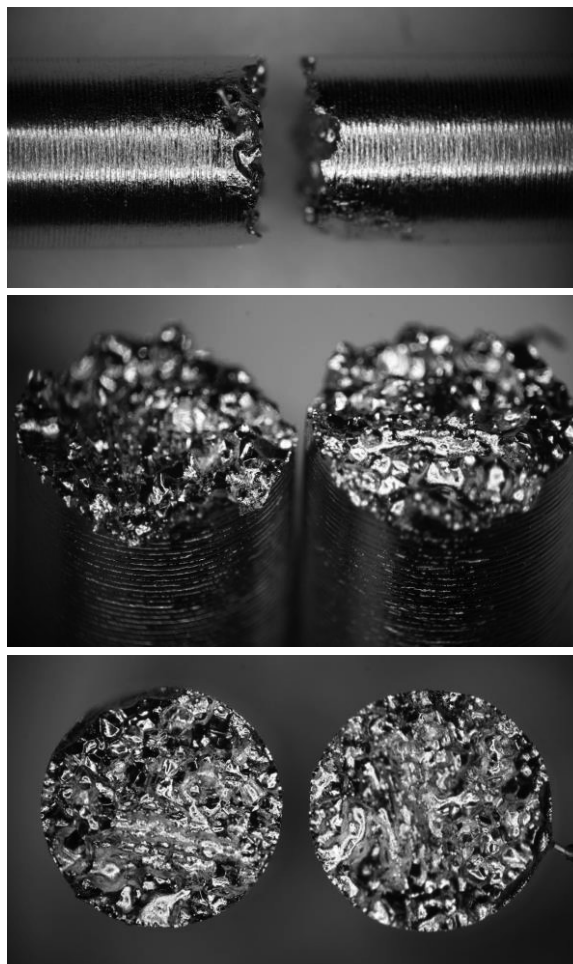
2. táblázat. A vizsgálatokból meghatározott NST értékek és a minta statisztikai jellemzői.

A töret kontrakció nélküli, felülete ezüstösen csillogó, a törés a szemcsehatárokon keresztül ment végbe. Egy próbatest törés utáni képe a 3. ábrán látható.

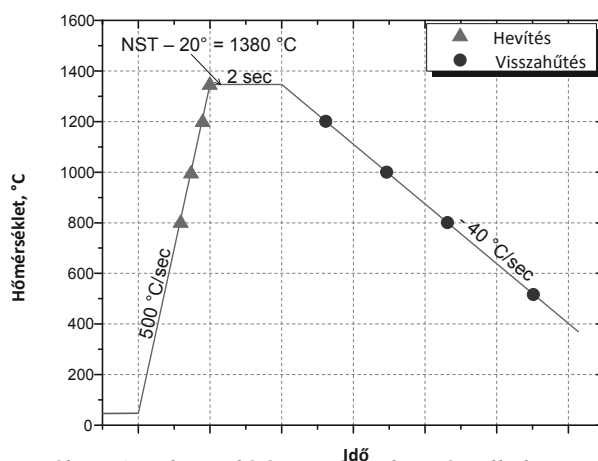
A melegsakító vizsgálatokra hevített (*on-heating*) és hevített-visszahűtött (*on-cooling*) próbatesteken került sor. A vizsgálatokhoz használt menetes végű, sima, hengeres próbatestek átmérője 10 mm, hossza 116,5 mm, a vizsgálati hossz pedig 80 mm volt.

Egy adott anyag esetében a NST meghatározása mindig megelőzi a hevítés vagy hevítés-visszahűtés közbeni szilárdság meghatározását, mivel a vizsgálatok maximális hőmérséklete a NST alatt kell hogy legyen, legalább 20-30 °C-kal. A vizsgált anyag esetében a megállapított NST, az átlag, 1403,8 °C volt, ezért

csúcshőmérsékletnek az 1380 °C-ot választottuk. Az alkalmazott hőmérséklet-idő diagramot, annak további paramétereit (hevítési sebesség, hőtartási idő a csúcshőmérsékleten, hűtési sebesség) és a konkrét vizsgálati hőmérsékleteket – felhasználva irodalmi tapasztalatokat [13-17] is – a 4. ábrán mutatjuk be.



3. ábra. Egy NST meghatározására használt próbatest a törés után.



4. ábra. A melegsakító vizsgálatok során alkalmazott hőmérséklet-idő diagram és a konkrét vizsgálati hőmérsékletek.

Az 5. ábrán egy próbatest látható a vizsgálat után. Az ábrán – a próbatest befogása mellett – jól megfigyelhető a kontrakció a szakadás helyén.



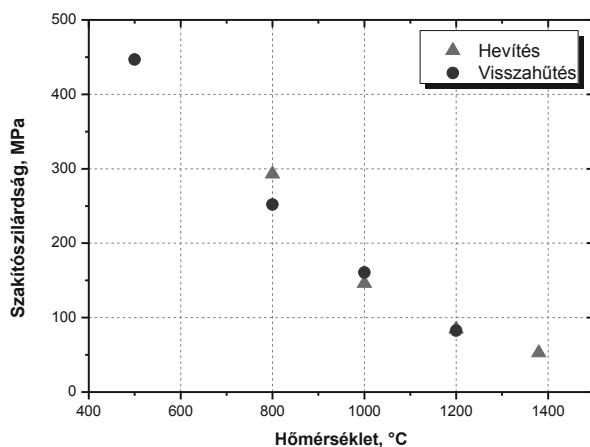
5. ábra. Egy melegsakító próbatest befogása és a próbatest a vizsgálat után.

A konkrét vizsgálati hőmérsékleteket, valamint a meghatározott szakítószilárdság és kontrakció értékeket a 3. táblázat mutatja be. A kontrakció esetében – kivételesen – olyan kerekítéseket alkalmaztunk, amelyek az eredmények közötti kis különbségeket is megmutatják.

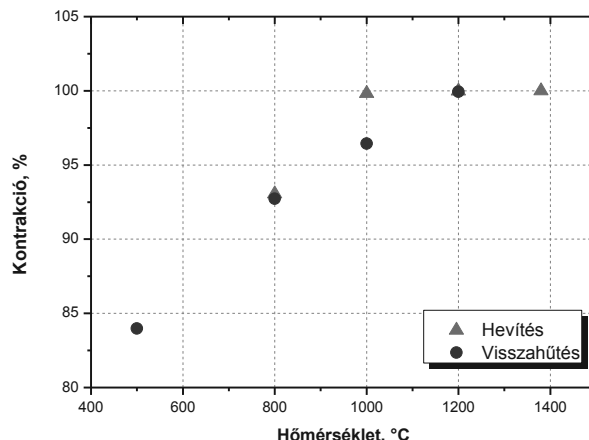
Hőciklus	T_{vizsg} , °C	R_m , MPa	Z, %
hevítés	800	292,8	93,05
	1000	146,0	99,82
	1200	84,4	99,99
	1380	52,8	100,0
hevítés-visszahűtés	1200	82,5	99,93
	1000	160,5	96,43
	800	252,0	92,73
	500	446,7	83,98

3. táblázat. A melegsakító vizsgálatok konkrét hőmérsékletei és eredményei.

A szakítószilárdság értékeket a vizsgálati hőmérséklet függvényében a 6. ábra, a kontrakció értékeit pedig a 7. ábra szemlélteti, mindkét ábrán megkülönböztetve a hevítés, illetve a hevítés-visszahűtés során kapott adatokat.



6. ábra. A melegsakító vizsgálatok eredményei: a szakítószilárdság értékek a hőmérséklet függvényében.



7. ábra. A melegsakító vizsgálatok eredményei: a kontrakció értékek a hőmérséklet függvényében.

A 6. és a 7. ábrákon látható pontsorok jellegükben és értékeikben összhangban vannak az irodalomban található adatokkal.

5. ÖSSZEFOGLALÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK

A közleményben leírtak alapján az alábbi, összefoglaló jellegű megállapítások tehetők.

A fizikai szimuláció (Magyarországon mindenképpen) újszerű és hatékony út a hegesztési folyamatok részleteinek pontos megismerése, megértése és fejlesztése területén.

A fizikai szimuláció ugyanakkor nem lehet és nem is az egyetlen út ezen a területen. Lehetőségeit és a segítségével elérhető eredményeket a technológiai vizsgálatok és próbák, a félempirikus és empirikus összefüggések, valamint a numerikus szimuláció párhuzamos alkalmazásával lehet igazán kihasználni.

Az S960QL jelű nagyszilárdságú acélon elvégzett vizsgálatok – amelyek az új berendezésen elvégzett első vizsgálatok voltak – megbízhatósága megfelelőnek ítéltető.

A vizsgált anyagminőségre meghatározott zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (*Nil-Strength Temperature* = NST) az elvégzett négy mérés átlagértékével (1403,8 °C) adható meg.

A hevített (*on-heating*) és hevített-visszahűtött (*on-cooling*) próbatesteken elvégzett melegsakító vizsgálatok eredményei megfelelőek és igaz ez azok tendenciájára is. További következtetések megfogalmazásához a vizsgálatok folytatása szükséges, két, esetleg három irányban. Mindenképpen szükséges az alkalmazott konkrét hőmérsékletek közötti lépcsők szűkítése (egyik irány), valamint a hőciklus hevítési és hűtési sebességeinek változtatása (másik irány). A további vizsgálati eredmények ismeretében lehet dönteni arról, hogy szükséges-e az egy-egy paraméter

kombinációval végzett vizsgálatok során a próbatestek számának növelése (harmadik irány), vagy sem.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] POHLE, C.: Zerstörende Werkstoffprüfung in der Schweisstechnik. Deutscher Verlag für Schweisstechnik DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
- [2] EASTERLING, K. E.: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Butterworths Monographs in Materials (BMM). Butterworths & Co (Publishers) Ltd., 1983.
- [3] BOESE, U.; WERNER, D.; WIRTZ, H.: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen. Teil II: Anwendung. Deutscher Verlag für Schweisstechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf, 1984.
- [4] BUCHMAYR, B.: Computer in der Werstoff- und Schweisstechnik: Anwendung von mathematischen Modellen. Deutscher Verlag für Schweisstechnik DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [5] BUCHMAYR, B.: WEZ-Kalkulator – ein Softwarepaket zum Berechnen schweisstechnischer Kennwerte. Schweißen und Schneiden 41, 1989 (2), p. 69-75.
- [6] LUKÁCS, J.; TÖRÖK, I.: A hegesztéstechnológia számítógéppel segített tervezése I. rész. Oktatási segédlet (AMT-OS/32), készült az OKKFT G/6-V. oktatási alprogram keretében. Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc, 1989. p. 1-89.
- [7] YUAN, B.; SHARPE, W. N. Jr.: Fatigue testing of microspecimens. Proceedings of the Sixth International Fatigue Congress (FATIGUE'96). Eds.: LÜTJERING, G.; NOWACK, H. Pergamon, 1996. Vol. III. p. 1943-1948.
- [8] 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) 329-332.
- [9] <http://www.bleeble.com/>
- [10] VERŐ, B.: A fizikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban. ISD DUNAFERR Műszaki Gazdasági Közlemények, XLVII. Évfolyam 4. szám (148.), 2007. p. 167-172.
- [11] VERŐ, B.: A fizikai és matematikai szimuláció helye és szerepe a vaskohászati kutatás-fejlesztésben. ISD DUNAFERR Műszaki Gazdasági Közlemények, XLVIII. évfolyam 3. szám (151.), 2008. p. 114-116.
- [12] VERŐ, B.: A fizikai és matematikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban. Bányászati és Kohászati Lapok, (145) 2012/1. szám, p. 2-6.
- [13] CHEN, Y.T. et al.: Microstructure and Mechanical Property Development in the Simulated Heat Affected Zone of V Treated HSLA Steels. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol. 19, No. 1, p. 57-67, February 2006.
- [14] XU, W. W. et al.: Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Microstructure and Toughness of a V-N Microalloyed Steel. Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium 2007. p. 234-239.
- [15] GÁSPÁR, M.; BALOGH, A.: Nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiájának fejlesztése a hűlési idő elemzésével, Doktoranduszok fóruma: Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország, 2011. november 8, p. 54-59.
- [16] GÁSPÁR, M.; BALOGH, A.: Experimental investigation on the effect of controlled linear energy applied to the welding of high strength steels. The Publications of the XXVI. microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, Miskolc. CD-ROM, p. 1-6.
- [17] GÁSPÁR, M.; BALOGH, A.: A vonalenergia optimális tartománya nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztésekor, 26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás Kiadványa, Óbudai Egyetem, Budapest, 2012, p. 173-178.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Gleeble 3500 termo-mechanikus fizikai szimulátor beszerzésére *A Miskolci Egyetem hazai és nemzetközi versenyképességének komplex megújítása* című, TIOP 1.3.1-07/1-2F-2008-0005 számú projekt keretében, 2012. nyarán került sor.

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