

HEGESZTÉSI MELEGREPEDÉS-ÉRZÉKENYSÉG MEGÍTÉLÉSE FIZIKAI SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL

EVALUATION OF THE HOT-CRACKING SENSIBILITY ON WELDING APPLYING PHYSICAL SIMULATION

Lukács János^{*}, Kuzsella László^{**}, Dobosy Ádám^{***}, Pósalaky Dóra^{***}

ABSTRACT

The physical simulation is an ultimate innovative way to develop the welding processes. The paper introduces the connection between weldability and physical simulation, the hot-cracking sensibility, the Gleeble 3500 thermo-mechanical physical simulator, respectively, and our experiments on two high strength low alloyed (HSLA) steels and on two aluminium alloys. Identification of the Nil-Strength Temperature (NST), furthermore the results of the Hot Tensile Tests (HTT), on heating and on cooling parts of the welding simulation curve are also investigated, are being introduced.

1. BEVEZETÉS

A hegeszthetőség megítélése általánosan és konkrétan egyaránt összetett feladat. Félémpirikus és empirikus összefüggések, technológiai vizsgálatok és próbák sokasága, valamint a számítógépes szimuláció eszköztára egyaránt rendelkezésre áll a felvetődő, általában 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, illetve a melegrepedés-érzékenység kérdéséről; másrészt bemutatni a tárgykörben, két nagyszilárdságú acélon és alumíniumötvözetben végzett első vizsgálatainkat, illetve azok eredményeit.

2. A HEGESZTHETŐSÉG ÉS A FIZIKAI SZIMULÁCIÓ

A hegeszthetőséggel összefüggő technológiai vizsgálatok és próbák egyidősek a különböző hegesztő eljárásokkal és technológiákkal. 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 definiált határok közötti alkalmazhatóság, valamint a korlátozott összehasonlíthatóság. Tekintettel a hegeszthetőség összetett problémakörére (anyagminőség, technológia, szerkezet stb.) [2, 3], nincs egyetlen olyan vizsgálat vagy próba, amellyel ez a problémakör megítélhető lenne, és annak nincs – de 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 hegeszthetőség tényezői közötti, bonyolult kapcsolatok más tulajdonságokkal (például mechanikai tulajdonságok) általában nem számszerűsíthetők.

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

A vizsgálatok, illetve próbák ellentmondásossága legalább kettős. Egyfelől, 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. Másfelől, 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)

^{*} egyetemi tanár

^{**} egyetemi docens

^{***} PhD hallgató

szimuláció [5], amellyel jelen közleményünkben nem foglalkozunk, másik iránya pedig a fizikai szimuláció. A fémiparban alkalmazott fizikai szimulációról az irodalomban a múlt század közepétől találunk említést, az első fizikai szimulátorok alapvető célja a hegesztési hőhatásövezet reprodukálhatóságának biztosítása volt [8]. Az első fizikai szimulációs rendszert, amely már kereskedelmi forgalomban is megjelent (1950-es évek vége), az USA-ban gyártották és a Gleeble 501 nevet kapta. A pneumatikus működtetésű terhelő rendszerrel felszerelt berendezést, az előzőekből következően, a hegesztési hőhatásövezetek szimulációjára tervezték. Két évtizeddel később (1979) a Dynamic Systems, Inc. (DSI) piacra vezette a második generációs számítógépes Gleeble 1500-as rendszert, amelyet korszerű elektronikával és hidraulikus egységekkel szereltek fel, illetve ellenállás hevítő rendszerrel egészítették ki azt. Ez az összeállítás új fizikai szimulációs alkalmazásokat tett lehetővé. A növekvő igényeknek megfelelően folyamatosan megjelentek továbbfejlesztett rendszerek, az ilyen fejlesztések eredménye lett a Gleeble 3500-as, majd Gleeble 3800-as rendszerek megszületése is [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.

A fizikai szimuláció tárgya az ipari folyamat alapanyaga, és azt – mint az ipari folyamat egy térfogatelemét – a szimuláció során az ipari folyamattal egyező hatásoknak tesszük ki. Ismert tény, hogy az ipari folyamatok során előforduló mechanikai, termikus és környezeti igénybevételek, illetve hatások általában nem önállóan, hanem együttesen, de nem szükségszerűen egy időben, jelentkeznek. Mindezekre tekintettel, 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 idő léptékben és a valóságot

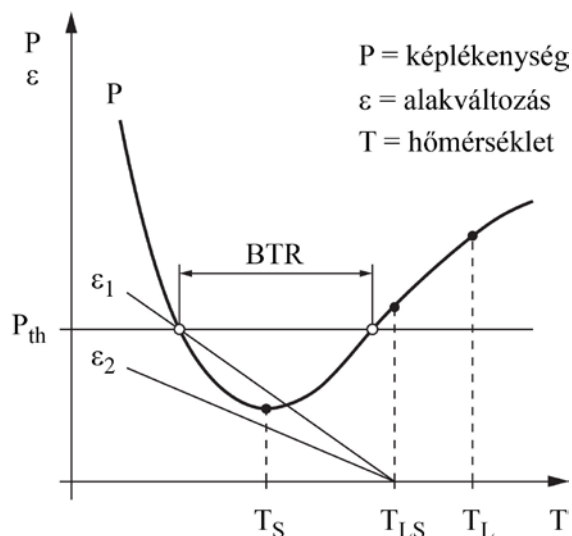
relevánsan megközelítő geometriai (térfogati) léptékben.

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, illetve próbatesteket érő hatások időbeli változását a megvalósítandó ipari folyamat jellege határozza meg;
- a fizikai szimulátorban kezelt próbadarabnak, illetve próbatestnek további vizsgálatokra is alkalmasnak kell lennie;
- a fizikai szimuláció a matematikai (numerikus, számítógépes) szimuláció és az ipari folyamat között, egyértelműen az ipari folyamathoz közelebb helyezkedik el;
- a fizikai és a matematikai szimuláció elválaszthatatlan egységet képez [10-12].

3. HEGESZTÉSI MELEGREPEDÉS-ÉRZÉKENYSÉG

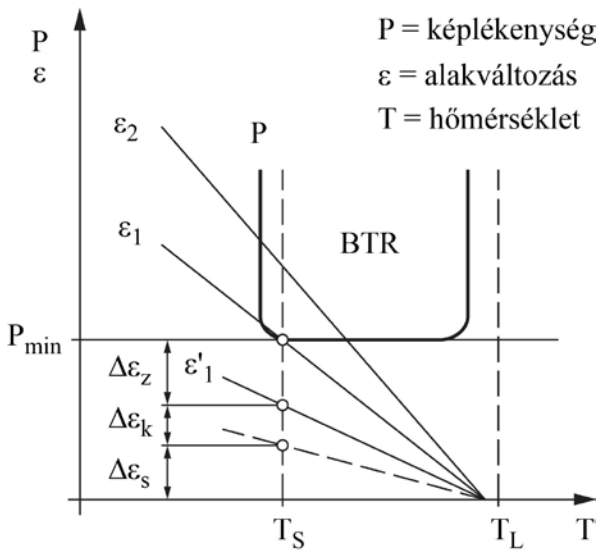
Melegrepedések a hegesztési folyamat során, magas hőmérsékleten keletkezhetnek. A varratfémbe képződött melegrepedések a kristályosodási repedések, a varrat mellett a varrat-alapanyag átmeneténél, közvetlenül a beolvadás vonalán vagy az alapanyagban létrejövő melegrepedések az újraömlési repedések [2, 3]. A melegrepedések keletkezésének alakváltozási elmélete, a 2. ábra segítségével, röviden, az alábbiakban foglalható össze [13].



2. ábra. Vázlat a melegrepedések keletkezésének alakváltozási elméletéhez [13].

A fémötvözet képlékenysége (P) a likvidusz (T_L) és a szolidusz (T_S) hőmérsékletek között a görbe szerint

változik, a melegrepedések elkerüléséhez szükséges alakváltozó képesség pedig P_{th} . Abban a hőközben (BTR), ahol a képlékenység nem éri el a szükséges (küszöb) alakváltozó képességet (vagyis $P < P_{th}$), melegrepedések keletkezhetnek. A varratfémre a kristályosodás közben – az egyenlőtlen hevítés és hűlés, illetve a gátolt zsugorodás miatt – húzófeszültségek hatnak, amelyek alakváltozást eredményeznek. Ha a varratfém alakváltozása meghaladja az alakváltozó képességet ($\epsilon_1 > P$), akkor repedés keletkezik, ennél kisebb alakváltozás esetén azonban nem ($\epsilon_2 < P$). A [14] közlemény a hegesztési hőciklus okozta alakváltozás (ϵ_s) és a zsugorodás okozta alakváltozás (ϵ_k) mellett értelmezi a tartalék alakváltozás (ϵ_z) fogalmát is (3. ábra), a tényleges (ϵ_1') és a határesethez tartozó (ϵ_1) esetek között.

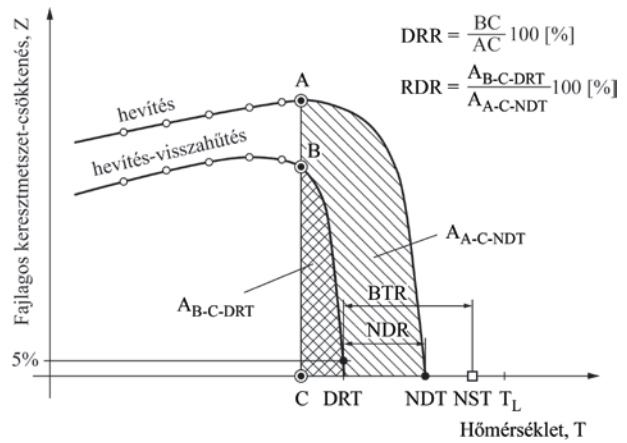


3. ábra. Alakváltozások a melegrepedések keletkezésének alakváltozási elméletében [14].

A melegrepedés-érzékenység fizikai szimuláción alapuló számszerűsítésére, illetve a különböző anyagok (pontosabban különböző hegesztéstechnológiákkal készített hegesztett kötések) érzékenységi hajlamának összehasonlítására több mennyiség használatos, részben az anyagminőségektől függően is. Ezeket foglalja össze a hevítéssel, illetve hevítéssel-visszahűtéssel elvégzett melegszakító, valamint zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet meghatározását célzó vizsgálatokra épülve a 4. ábra [1, 15, 16].

A 4. ábra segítségével értelmezhető mennyiségek – részben kísérletet téve azok magyar nyelvű megnevezésére is – a következők:

- *NST*: zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (*Nil-Strength Temperature*);
- *NDT*: zérus alakváltozó képességhez tartozó hőmérséklet (*Nil-Ductility Temperature*);
- *DRT*: az alakváltozó képesség helyreállításának hőmérséklete (*Ductility Recovery Temperature*);



4. ábra. A melegrepedés-érzékenység számszerűsítésének fizikai szimuláción alapuló lehetőségei.

- *BTR*: minimális alakváltozó képesség / ridegség hőmérséklet tartománya (*Brittleness Temperature Range*);
- *NDR*: zérus alakváltozó képesség tartománya (*Nil-Ductility Range*);
- *DRR*: az alakváltozó képesség helyreállításának aránya (*Ductility Recovery Rate*);
- *RDR*: az alakváltozó képesség helyreállításának aránya (*Ratio of Ductility Recovery*).

4. NST ÉS HTT VIZSGÁLATOK, AZOK EREDMÉNYEI

A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (*NST*) meghatározására S690QL és S960QL jelű nagyszilárdságú acélok, valamint AlMg3 (5754) és 6082-T6 jelű alumíniumötvözeteken került sor.

A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet az a hőmérséklet amelynél a próbatest a legkisebb ráadott terhelés hatására elszakad. A *NST* hőmérséklet, reprodukálható meghatározására a legtöbb anyagvizsgáló berendezés nem alkalmas. Ennek oka kettős: egyrészt a vizsgált anyag olvadáspontjához közeli hőmérsékletre kell hevíteni a próbatestet, jól szabályozható módon, az eredmény hőmérséklet közelében kis ($1-2 \text{ K/s}$) hevítési sebességgel; másrészt a berendezésnek biztosítania kell a minimálisan előfeszített állapotot, aminek állandó értéken tartása, a hőtágulás miatt komoly szabályozástechnikai probléma. Az olvadáspont közelében hőmérsékletek 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 a 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.

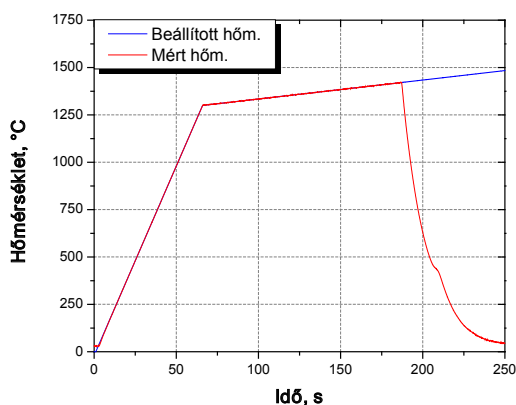
A vizsgálathoz használt sima, hengeres próbatetek átmérője mindegyik anyagminőség esetében 6 mm, hossza 80 mm, a vizsgálati hossz pedig 25 mm volt. A vizsgálat közbeni előfeszítés megválasztása során figyelembe kell venni azt, hogy a terhelésnek minél kisebbnek kell lennie, ám a túl kis előterhelés a vizsgálat reprodukálhatóságát rontja, a meghatározott NST érték bizonytalanságát pedig növeli. Tekintettel ezekre és a próbatetek geometriájára, a vizsgálatokhoz 80 N-os előterhelést alkalmaztunk.

A NST a vizsgált anyag szolidusz hőmérsékletéhez (T_S) közeli érték, pontos megállapítása érdekében a szolidusz hőmérséklet előtt a hevítési sebességnek minél kisebbnek kell lennie. Ezért a vizsgálat során célszerű két hevítési sebességet alkalmazni. Az általunk alkalmazott hevítési sebességeket és azok hőmérséklet tartományait az 1. táblázatban foglaltuk össze.

Anyagminőség	Első szakasz ($T_{szoba}-T_x$)		Második szakasz (T_x-NST)
	$T_x, ^\circ C$	$v_{hev}, ^\circ C/s$	$v_{hev}, ^\circ C/s$
S690QL	1300	20	1
S960QL	1300	20	0,5
AlMg3 (5754)	575	25	1,5 vagy 0,5
6082-T6	575	25	1

1. táblázat. A NST vizsgálatok paramétereit.

Az 5. ábrán a vezérlő jel és a próbatesten ténylegesen mért hőmérséklet diagramja látható, példaként, az S690QL jelű acélból készült, 6S-BM-NST-10 jelű próbatesten.



5. ábra. A vezérlő jel és a próbatesten mért tényleges hőmérséklet (S690QL acél, 6S-BM-NST-10 próbatetek).

A diagramon a vezérlő jel kék, míg a próbatestre erősített termoelemek által szolgáltatott adatokból meghatározott hőmérséklet piros vonallal került

ábrázolásra. Jól megfigyelhető, hogy a két görbe tökéletesen együtt fut, a berendezés szabályozásának köszönhetően. A két görbe szétválása jelzi a próbatetek elszakadását, a hozzá tartozó hőmérséklet a NST. A 2. táblázat bemutatja az S690QL jelű acélból készült próbatetekeken elvégzett NST vizsgálatok eredményeit, ugyancsak példaként.

A próbatetek jele	NST, $^\circ C$
6S-BM-NST-01	1443
6S-BM-NST-02	1450
6S-BM-NST-03	1395
6S-BM-NST-04	1416
6S-BM-NST-05	1394
6S-BM-NST-06	1415
6S-BM-NST-07	1429
6S-BM-NST-09	1430
6S-BM-NST-10	1421

2. táblázat. Az S690QL jelű acélból készült próbatetekeken meghatározott NST hőmérsékletek.

A négy anyagminőségen elvégzett NST vizsgálatok eredményeit a 3. táblázatban foglaltuk össze.

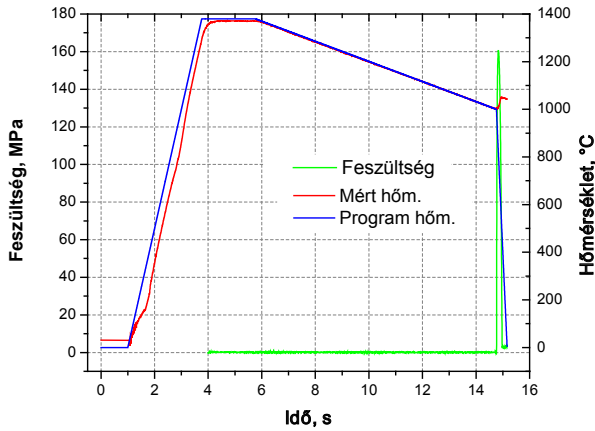
Anyagminőség	A próbatetek száma	Átlag, $^\circ C$	Szórás, $^\circ C$	Szórási együttható, %
S690QL	9	1421,5	19,15	1,35
S960QL	11	1408,0	30,46	2,16
AlMg3 (5754)	10	602,6	1,81	0,30
6082-T6	10	616,6	7,15	1,16

3. táblázat. A négy anyagminőségen elvégzett NST vizsgálatok eredményei.

A melegsakító vizsgálatokra (HTT) az S960QL jelű acélból kimunkált próbatetekeken, hevítéses, valamint hevítéses-visszahűtéses technikával került sor. A vizsgálatokhoz használt menetes végű, sima, hengeres próbatetek átmérője 10 mm, hossza 116,5 mm, a vizsgálati hossz pedig 80 mm volt.

Egy adott anyagminőség esetében a NST meghatározása mindig megelőzi a hevítés vagy hevítés-visszahűtés közbeni szilárdság és kontrakció meghatározását, mivel a vizsgálatok maximális hőmérséklete a NST alatt kell hogy legyen, legalább 20-30 $^\circ C$ -kal. Az S960QL jelű anyag esetében a mérések átlagából megállapított NST érték 1408 $^\circ C$ volt, ezért csúcshőmérsékletnek az 1380 $^\circ C$ -ot választottuk. A vizsgálatokhoz alkalmazott hőmérséklet-idő diagram további paramétereit és magukat a konkrét vizsgálati hőmérsékleteket, irodalmi tapasztalatokat [17-21] is felhasználva határoztuk meg. A hevítési sebesség 500 $^\circ C/s$, a hőtartási idő a csúcshőmérsékleten 2 s, a hűtési sebesség pedig 40 $^\circ C/s$ volt. Az ezekkel a paraméterekkel beállított vezérlő jelet, valamint a

termoelemek által szolgáltatott adatokból meghatározott hőmérsékletet a 6. ábrán mutatjuk be, egy hevítés-visszahűtéses esetre, példaként. A berendezés szabályozásának megbízhatósága, hasonlóan az 5. ábrához, ennek az ábrának az alapján is megállapítható.



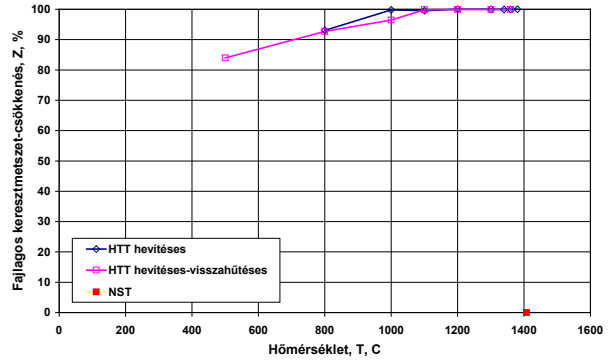
6. ábra. Egy hevítéses-visszahűtéses melegsakító vizsgálat hőmérséklet-idő diagramja (S960QL jelű acél, 1300°C/1000°C).

A melegsakító vizsgálatok konkrét hőmérsékleteit és eredményeit, a számított fajlagos keresztmetszet-csökkenés (Z) értékeket, a 4. táblázatban mutatjuk be és a 7. ábrán – a NST vizsgálatok eredményével együtt – szemléltetjük. A 4. táblázatban ezúttal nem alkalmaztuk a szokásos kerekítéseket, hogy az eredmények közötti kis különbségek is láthatók legyenek.

Felhasználva a 4. ábrán bemutatott értelmezéseket, a HTT vizsgálatok eredményeit és a 3. táblázatban található NST hőmérsékletet, az S960QL jelű acélra $NDT = 1390\text{ °C}$, $DRT = 1370\text{ °C}$, $BTR = 38\text{ °C}$, $NDR = 20\text{ °C}$.

$T_{hev},\text{ °C}$ vagy $T_{hev}/T_{hüt},\text{ °C/°C}$	Z, %
800	93,05
1000	99,82
1100	99,52
1200	99,99
1300	99,99
1340	99,91
1360	99,97
1380	100,00
1380/1360	99,95
1380/1300	99,94
1380/1200	99,93
1380/1100	99,85
1380/1000	96,43
1380/800	92,73
1380/500	83,98

4. táblázat. Az S960QL jelű acélon elvégzett melegsakító (HTT) vizsgálatok eredményei.



7. ábra. Az S960QL jelű acélon elvégzett melegsakító (HTT) vizsgálatok eredményei.

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.

A Gleeble 3500 termo-mechanikus szimulátorral a zérus szilárdsághoz tartozó hőmérsékletek (NST) nagy megbízhatósággal határozhatók meg.

Az elvégzett NST vizsgálatok alapján a vizsgált anyagminőségek NST hőmérsékletei az alábbiak:

- S690QL jelű acél: 1421 °C;
- S9060QL jelű acél: 1408 °C;
- AlMg3 (5754) jelű alumíniumötvözet: 603 °C;
- 6082-T6 jelű alumíniumötvözet: 607 °C.

Az elvégzett zérus szilárdság (NST) meghatározásait célzó és melegsakító (HTT) vizsgálatok, valamint irodalmi megfontolások (például [14]) alapján az valószínűsíthető, hogy az S960QL jelű acél melegrepedés-érzékenységi hajlamot nem mutat. Ennek igazolásához további vizsgálatokra, illetve elemzésekre van szükség.

A fizikai szimulációval meghatározott mennyiségek alkalmasak hegeszthetőségi problémák előrejelzésére, rámutatnak azok elkerülésének szükségességére, ezeken keresztül pedig segítik a megbízható minőséget biztosító hegesztéstechnológiák tervezését.

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 került sor.

A közleményben 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] 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] ROMVÁRI, P.: Hegesztéstechnológia. I. rész. A hegesztés fizikai és metallurgiai alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- [14] ADAMIEC, J.; KALKA, M.: Brittleness temperature range of Fe-Al alloy. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME), vol. 18, Iss. 1-2, September-October 2006, p. 43-46.
- [15] MANDZIEJ, S. T.: Physical Simulation of Metallurgical Processes. Materiali in tehnologije / Materials and technology 44 (2010) 3, p. 105-119.
- [16] Gleeble Users Training – 2011 – Gleeble Systems and Applications. Dynamic Systems Inc., Poestenkill, New York. 08/07-Rev02.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.