

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



**AUTOTECH - „Járműipari anyagfejlesztések:
célzott alapkutatás az alakíthatóság, hőkezelés
és hegeszthetőség témaköreiben”**

TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029

www.autotech.uni-miskolc.hu



**ANYAGSZERKEZETTANI ÉS ANYAGTECHNOLÓGIAI
INTÉZET KÜLÖNSZÁMA**

2013/8.

nka
Nemzeti Kulturális Alap

64 oldal
LXIV. évfolyam

VILÁGVEZETŐ A NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK TERÜLETÉN



Az SSAB világvezető a hozzáadott értékű, nagyszilárdságú acélok területén, de még ennél is több. Élen állunk a design, innováció, technológia és környezeti felelősségvállalás területén is.

Együtt a partnereinkkel mi tovább megyünk mint bárki más, hogy realizáljuk a könnyebb, erősebb és tartósabb acéltermékekben rejlő lehetőségeket.

SSAB termékeit az alábbi márkanevek fémjelzik: Hardox®, Domex®, Weldox®, Docol®

SSAB Swedish Steel Trading Ltd

Pócsi u. 11
9400 Sopron
Hungary
geza.maroth@ssab.com
T: +36 99 510 510

www.ssab.com

SSAB

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

A szerkesztésben közreműködött:

Dr. Balogh András

Dr. Lukács János

Dr. Nagy Gyula

Dr. Török Imre

Tisztelt Olvasó!

A Miskolci Egyetem, a győri Széchenyi István Egyetem és a Kecskeméti Főiskola, mint felsőoktatási partnerek, valamint a Bay-Logi Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. konzorciuma pályázatot nyert el az Új Széchenyi Terv Társadalmi Megújulás Operatív Program (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV) keretében *"Járműipari anyagfejlesztések: célzott alapkutatás az alakíthatóság, a hőkezelés és a hegesztés témaköreiben"* címmel. A konzorcium vezetője a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Mechanikai Technológiai Tanszéke. A 24 hónapos futamidőre elnyert támogatás összege: 473 millió Ft. A projekt 2013. január 1-én indult, a tervezett befejezési határidő: 2014. december 31.

A projekt fő célkitűzése a járműipar, mint célzott felvevő ipar igényei és az e területen világszerte megmutatkozó tendenciák figyelembevételével integrált anyagtudományi és anyagtechnológiai kutatások komplex megvalósítása az együttműködő konzorciumi tagok, valamint külföldi és hazai partnerintézmények közreműködésével.

Magyarországon a járműipar a kiemelt stratégiai húzóágazatok egyike, magas hozzáadott értékű, a hazai GDP jelentős hányadát biztosító tudás-intenzív ágazat. A járműipari fejlesztések terén – a globális fejlesztési trendekkel összhangban – az egyik legfontosabb fejlesztési terület a járművek tömegének csökkentése. A tömegcsökkentés fő irányait anyagtudományi oldalról a nagyszilárdságú acélok, a könnyűfémek (elsősorban az alumínium), valamint a különféle szálerősítések, polimer mátrixú kompozitok alkalmazása jelenti. E korszerű anyagok alkalmazása a járműiparban széles körben alkalmazott anyagtechnológiákkal szemben is új követelményeket, fejlesztési igényeket támasztanak. A projektben résztvevő partner intézmények kompetencia területe a korszerű új anyagok fejlesztése, és az előzőekben említett anyagtechnológiák (hegesztés, hőkezelés, képlékenyalakítás) szinergikus fejlesztése, minél szélesebb körű ipari alkalmazási lehetőségeinek kutatása, amelyek hozzájárulhatnak a hazai járműipar nemzetközi versenyképességének fokozásához is. Az előzők alapján a kutatási feladat anyag oldalról a különféle nagyszilárdságú acélok, valamint az autóiparban egyre növekvő mértékben alkalmazott alumínium és magnézium ötvözetek jellemzőinek vizsgálatát, míg technológiai oldalról e korszerű, új anyagok hegeszthetőségi, hőkezelési és alakíthatósági kérdéseinek elemzését tűzte ki célul.

A kutatások 5 Tudományos Műhelyben, 17 K+F téma keretében folynak. A kutatócsoportokban, Tudományos Műhelyekben folyó munkáról, az eddigi eredményekről adunk számot a Gép folyóirat e számában. A kutatások a bevezetőben említett projektben az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

Prof. Dr. Tisza Miklós
egyetemi tanár, intézetigazgató

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: 06-46/379-530, 06-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 06-1/202-0656, fax: 06-1/202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknél, e-mailen: hirlapelofizetes@posta.hu, faxon: 06-1/303-3440. További információ: 06-80/444-444

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Tisza M.; Kocsisné Baán M.; Marosné Berkes M.; Török I.:

JÁRMŰIPARI ANYAGFEJLESZTÉSEK 5
A Miskolci Egyetem vezetésével három magyar felsőoktatási intézmény és egy kutatóintézet közös kutatást folytat a járműipari anyagfejlesztések témakörében. A szponzorált alapkutatások az autógyártás fém és nemfém anyagaira, az acélok alakíthatóságára, hőkezelésére és hegesztésére irányulnak.

2. Balogh A.; Gáspár M.; Prém L.:

A HEGESZTETT SZERKEZETEK KONVENCIONÁLIS ÉS KORSZERŰ NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLJAINAK RENDSZEREZÉSE ÉS HEGESZTÉSI NEHÉZSÉGEI 7
A modern nagyszilárdságú acélok gyors fejlődésével az acélok megalapozott csoportosítási rendszere nem tartott lépést. Szerzők a hegesztett szerkezetek konvencionális és a korszerű anyagaira időtálló osztályozási rendszert dolgoztak ki. A nagyszilárdságú acélok hegesztése sok problémát hozott felszínre.

3. Balogh A.; Prém L.:

FERRIT-MARTENSITES (DP) ACÉL VÉKONYLEMEZEK ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTHETŐSÉGE 13
Szerzők a svéd SSAB által gyártott Docol DP 600, DP 800 és DP 1000-es márkajelű nagyszilárdságú autóipari acéllemezek ellenállás-ponthegeszthetőségét vizsgálják. A DP 600-as acél relatíve jól ponthegezhethető, de a másik két acélminőség különleges hegesztéstechnológiát igényel.

4. Gáspár M.; Prém L.; Vékony S.; Balogh A.:

DP 600 AUTÓIPARI ACÉL AWI HEGESZTÉSÉNEK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE 19
A ferrit-martensites DP acélok megkívánt mechanikai jellemzőit a gyártók különböző alakítási és hőkezelési folyamatokkal érik el. A szerkezet instabilitása hegesztési nehézségeket okoz. A cikk a vékonylemezek AWI hegesztésének tervezésekor felhasználható végeselemes modellezési lehetőségeket mutatja be.

5. Meilinger Á.; Lukács J.:

ALUMÍNIUMÓTVÖZETEK LINEÁRIS DÖRZSHEGESZTÉSSEL KÉSZÜLT KÖTÉSEINEK VISELKEDÉSE ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTEL ESETÉN 25
A cikkben bemutatott kutatómunka egyrészt a lineáris dörzshegesztéssel (FSW) készített kötések ismétlődő terheléssel szembeni ellenállóképességének vizsgálatára, másrészt egyes Al ötvözetek és a belőlük FSW eljárással hegesztett kötések kifáradási határának vagy tervezési görbéinek meghatározására irányult.

6. Somoskői G.:

KIS TELJESÍTMÉNYŰ ELJÁRÁS VÁLTOZATOK ÉS AZ ANYAGÁTVITEL MÓDJAI A VÉDŐGÁZAS FOGYÓELEKTRÓDÁS HEGESZTÉS TERÜLETÉN 31
Szerző megkísérel különbséget tenni a hegesztőgép piacon jelen lévő nagyszámú hegesztő eljárás változat között. Részletesen foglalkozik a védőgáz, fogyóelektrodás ívhegesztés (VFI) kisteljesítményű (a rövidíves tartományban működő) variánsaival.

7. Dobosy Á.; Gáspár M.; Prém L.; Meilinger Á.:

BESZÁMOLÓ AZ I. HEGESZTÉSI NYÁRI EGYETEMRŐL 35
Idén júliusban rendezte meg a GTE Hegesztési Szakosztályának Ifjúsági Fóruma az I. Hegesztési Nyári Egyetemet a Miskolci Egyetemen. A fiatal résztvevők szakmai előadások meghallgatása után hangulatos programokon ismerkedtek egymással és neves hegesztési szakemberekkel.

8. Nagy Gy.; Dobosy Á.; Lukács J.:

KISCIKLUSÚ FÁRASZTÁSNÁL MEGHATÁROZOTT MÉRŐSZÁMOK MEGBÍZHATÓSÁGA .. 39
A cikk a kisciklusú fárasztóvizsgálatok során mért paraméterek megbízhatóságával foglalkozik. Többek között megállapítást nyert, hogy a feszültség amplitúdók szórási együtthatója kisebb, mint az anyagvizsgálat által meghatározott más feszültség jellegű mérőszámoké.

9. Lukács J.; Kuzsella L.; Dobosy Á.; Pósalaky D.:

HEGESZTÉSI MELEGREPEDÉS-ÉRZÉKENYSÉG MEGÍTÉLÉSE FIZIKAI SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL 45
Szerzők elemzik a fizikai szimuláció és a hegeszthetőség, valamint a melegrepedés-érzékenység kapcsolatát. Bemutatják két nagyszilárdságú acélon és egy alumínium-ötvözetben a Gleeble 3500 típusú szimulátorral végzett vizsgálataik eredményeit.

10. Kerekes G.; Kocsisné B. M.; Felde I.:

EDZÉSHEZ ALKALMAZOTT HŰTŐKÖZEGEK MINŐSÍTÉSE 51
A hűlési görbék alakja a hűtőközegtől és a hűtőközeg állapotát leíró paraméterektől függ. A cikk a hűtőközegek fontosabb paramétereinek (hőmérséklet, keringtetési sebesség, koncentráció) a hűléssebességre gyakorolt hatását mutatja be.

11. Tisza M.; Kovács P. Z.:

LEMEZANYAGOK ALAKÍTHATÓSÁGA, AZ ALAKÍTÁSI HATÁRDIAGRAMOK MEGHATÁROZÁSÁNAK VIZSGÁLATA 55
A nagyszilárdságú acéllemezek használata az autóiparban gyakran okoz alakíthatósági problémákat. Szerzők ismertetik az acél finomlemezek alakíthatóságának megítélésére leginkább alkalmas alakítási határdiagramokra irányuló elméleti és kísérleti vizsgálataikat.

JÁRMŰIPARI ANYAGFEJLESZTÉSEK

MATERIAL DEVELOPMENTS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Dr. Tisza Miklós*

Kocsisné dr. Baán Mária**

Dr. Marosné dr. Berkes Mária**

Dr. Török Imre***

1. Bevezetés, előzmények

Három felsőoktatási intézmény – a Miskolci Egyetem, a győri Széchenyi István Egyetem és a Kecskeméti Főiskola – valamint a Bay-Logi Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. konzorciuma sikeres pályázatot nyert el az Új Széchenyi Terv Társadalmi Megújulás Operatív Program (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV) keretében „Járműipari anyagfejlesztések: célzott alapkutatás az alakíthatóság, a hőkezelés és a hegesztés témaköreiben” címmel. A konzorcium vezetője a Miskolci Egyetem Gépeszmérnöki és Informatikai Karának Mechanikai Technológiai Tanszéke. A 24 hónapos futamidőre elnyert támogatás összege: 473 millió Ft.

2. A projekt célkitűzései

A projekt fő célkitűzése a járműipar, mint célzott felvevő ipar igényei és az e területen világszerte megmutatkozó tendenciák figyelembevételével integrált anyagtudományi és anyagtechnológiai kutatások komplex megvalósítása az együttműködő konzorciumi tagok, valamint külföldi és hazai partnerintézmények közreműködésével.

Magyarországon a járműipar a kiemelt stratégiai húzóágazatok egyike, magas hozzáadott értékű, a hazai GDP jelentős hányadát biztosító tudás-intenzív ágazat. A világméretű globális versenyben az autóiipari fejlesztéseket számos, gyakran egymásnak is ellentmondó követelmény ösztönzi: fogyasztói oldalról a gazdaságos üzemeltetés mellett a fokozódó teljesítmény, biztonság és kényelem igénye a meghatározó, míg a környezetvédelem szempontjait tükröző törvényi előírások a gépjárművek káros anyag kibocsátásának egyre szigorodó követelményeit írják elő. Ezek az elvárások részben összhangban vannak, részben olyan ellentmondásos követelményeket támasztanak, amelyek kielégítése új anyagok és új eljárások alkalmazását igényli. A járműipari fejlesztések, mint kiemelt gazdaságfejlesztési program egyik legfontosabb fejlesztési területe a járművek tömegének csökkentése. A tömegcsökkentés fő irányait anyagtudományi oldalról a nagyszilárdságú acélok, a könnyűfémek (elsősorban az alumínium), valamint a különféle szálerősítéses, polimer mátrixú kompozitok alkalmazása jelenti. Az előzők alapján a kutatási feladat anyag oldalról a különféle nagyszilárdságú acélok, valamint az autóiiparban egyre növekvő

* egyetemi tanár, intézetigazgató

** egyetemi docens

*** c. egyetemi tanár

mértékben alkalmazott alumínium és magnézium ötvözetek jellemzőinek vizsgálatát tűzi ki célul.

Az alábbi ábra az utóbbi évtizedek acélfejlesztésének nemzetközi tendenciáit foglalja össze, amely az anyagkutatások fő irányait is kijelöli a projektben.

A partner-intézmények kompetencia területe a korszerű új anyagok fejlesztése, minél szélesebb körű ipari alkalmazási lehetőségeinek kutatása, amelyek hozzájárulhatnak a hazai járműipar nemzetközi versenyképességének fokozásához is.

A kutatások 5 Tudományos Műhelyben 17 K+F téma keretében folynak, amelyekről rövid összefoglaló leírást ezen a poszteren közlünk, a Tudományos Műhelyekben folyó kutatások eredményeit a konferencia szekciókban elhangzó orális előadások és a kiállított további poszterek mutatják be.

3. Hegesztési kutatások

A Hegesztési Tudományos Műhelyben a járműipari hagyományos és új fejlesztésű nagyszilárdságú acélok, alumínium ötvözetek hegesztésének kutatása, a technológiai paraméterek numerikus optimalizálása, a hegesztési folyamatok végeselemes modellezése és fizikai szimulációja a fő feladat. Ennek keretében a következő K+F programok megvalósítása folyik:

1. Vékonylemezek ellenállás- és ömlesztő hegeszthetőségi feltételeinek kutatása
2. Hidegen alakított és bevonatolt lemezek hegeszthetősége
3. Hegesztett kötések egyenértékűségi kritériumainak vizsgálata
4. Hegesztési technológiák tervezése és optimalizálása

4. Hő- és felületkezelés kutatások

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéke a különféle termokémiai kezelések terén elismert kutatóhely. Ennek alapján a Hő- és Felületkezelési Tudományos Műhelyben ez a témakör fontos kutatási terület, amelyet azonban új területekkel is bővítettünk. A Tudományos Műhelyben a következő K+F programok megvalósítása folyik:

1. Innováció és technológia-transzfer a termokémiai eljárások területén
2. A járműiparban használatos hűtési közegek hűtési teljesítményének meghatározását és a hűtési eljárás optimalizálását megalapozó mérési és szimulációs módszer kifejlesztése
3. Komplex felületvizsgálati módszerek kidolgozása a hő- és felületkezelési technológiák fejlesztése céljából

5. Képlékenyalakítási kutatások

A képlékenyalakítás a járműiparban különösen a karosszéria alakításban meghatározó technológia. Ez az a terület, ahol a korszerű nagyszilárdságú acélok alkalmazása az utóbbi évtizedekben a legnagyobb volt. Ennek megfelelően az Alakítási Tudományos Műhelyben a járműipari hagyományos és új fejlesztésű nagyszilárdságú acélok, alumínium ötvözetek alakíthatóságának kutatása, új alakító eljárások kidolgozása kiemelt jelentőségű. Ebben a Tudományos Műhelyben a következő K+F programok megvalósítása folyik:

1. Hagyományos és extra-nagyszilárdságú acélok alakíthatóságának kutatása
2. Új, innovatív alakító technológiák kidolgozása
3. Integrált technológiai és szerszámozási rendszerek fejlesztése

6. Nemfémek járműipari anyagkutatások

Ebben a Tudományos Műhelyben a fémek anyagok mellett a járműiparban is egyre nagyobb jelentőségre szertevő műszaki műanyagok, polimerek, nano-kompozitok kutatása folyik az alábbi K+F témákban:

1. Műszaki műanyagok, új polimer technológiák kutatása
2. Polimer nano-kompozitok és nano-fázissal erősített kerámia kompozitok vizsgálata
3. Grafén nanolitográfiai szimulációs kutatások
4. Porózus, rácsos megtámasztású héjszerkezetek kutatása

7. Technológiai maradó feszültségekkel kapcsolatos kutatások

A különféle technológiák, megmunkálások gyakran eredményeznek jelentős maradó feszültségeket az alkatrészekben, szerkezetekben, amelyek a szerkezetek élettartamát is befolyásolják. Ezért is tűztük ki célul a technológiai maradó feszültségek vizsgálatát is, amely az alábbi K+F témakörökben folyik:

1. A technológiai maradó feszültségek modellezése és alkalmazhatóságuk a járműiparban
2. A technológiai maradó feszültségek mérési módszereinek kutatása
3. A technológiai maradó feszültségek hatása a hegesztett járműipari szerkezetek integritására

8. Köszönetnyilvánítás

Az ismertetett kutatások az AutoTech rövid névvel jelölt TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029. Járműipari anyagfejlesztések projektben valósulnak meg az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében, az Európai Unió és az Európai Szociális Alap finanszírozásában.



ANYAGVIZSGÁLAT * HEGESZTÉS * HŐKEZELÉS * KÉPLÉKENYALAKÍTÁS
OKTATÁS * KUTATÁS-FEJLESZTÉS * SZAKÉRTÉS
MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

ANYAGSZERKEZETTANI ÉS ANYAGTECHNOLÓGIAI INTÉZET
ALKALMAZOTT ANYAGTUDOMÁNY * TECHNOLÓGIATERVEZÉS * KONSTRUKCIÓS
TERVEZÉS

ANYAGTECHNOLÓGIAI (BSc SZAKIRÁNY) * HEGESZTÉSTECHNOLÓGIAI (MSc SZAKIRÁNY)
NEMZETKÖZI HEGESZTŐ SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉSI SZAK IWE/EWE KÉPZÉS
SZÁMÍTÓÉPES TERVZÉS ÉS GYÁRTÁS SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉSI SZAK
3515 MISKOLC-EGYETEMVÁROS * TEL. +36 46 565 164 * FAX: +36 46 561 504 *

A HEGESZTETT SZERKEZETEK KONVENCIONÁLIS ÉS KORSZERŰ NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLJAINAK RENDSZEREZÉSE ÉS HEGESZTÉSI NEHÉZSÉGEI

CLASSIFICATION AND WELDING DIFFICULTIES OF CONVENTIONAL AND ADVANCED STEELS FOR WELDED STRUCTURES

Dr. Balogh András*, Gáspár Marcell**, Prém László**

Abstract

In the last three-four decades steel as the most important base material of present and future welding structures has progressed in unimaginable measure. Steel grades developed on new theoretical bases and manufacturing procedures can not be listed into the traditional categories, while new and widely accepted grouping system does not exist. Focusing on automotive steel sheets and on the medium and thick plates of the moving or mobile welded structures a new classification system was elaborated. The new system is based on the k_m material constant can be calculated as the product of R_m ultimate tensile strength and the A_1 total elongation, therefore it can be applied not only for conventional high strength steels (CHSS) but for the available first, and the presently developed second and third generations of advanced high strength steels (AHSS). Arc and resistance welding tasks of the CHSS and AHSS have brought new welding difficulties to the surface, whose solution seems not to be a simple matter.

1. Bevezetés

A világ országainak anyagfelhasználási adataiból jól látható, hogy a korszerűnek tekintett szerkezeti anyagok (elsősorban a kompozitok és polimerek) bizonyos fokú térnyerése mellett ma is a fémek és fémötvözetek (továbbiakban a rövidség kedvéért a *fémek*) tekinthetők a legfontosabb szerkezeti anyagnak és a gyártási adatok, valamint a felhasználási trendek arra utalnak, hogy ezen a téren az elkövetkezendő évtizedekben sem lesz jelentős változás [1].

A hozzáférhetőség, a komplex tulajdonságok és nem utolsósorban az árviszonyok komplex nézőpontjából könnyen belátható, hogy a 21. század elején, a fémcsoporton belül az acélok (mint vasötvözetek), valamint kisebb mértékben az alumíniumötvözetek, esetenként extra célokra a nikkel- és titánötvözetek tekinthetők a mérnöki célokra leginkább alkalmas szerkezeti anyagoknak.

* egyetemi docens

** PhD hallgató

A vasérc előfordulási gyakorisága, az acél jól kidolgozott és nem túl bonyolult előállítási technológiája, kiváló fizikai és mechanikai jellemzői, jó feldolgozhatósága, tartóssága, sokfélesége, az acélhulladék egyszerű újrahasznosítási lehetősége az acélt a jelenkor és a közeljövő legfontosabb szerkezeti anyagává teszi. Állításunkat azzal a példával illusztráljuk, amely szerint egy többféle anyagféleséget tartalmazó tipikus tömeggyártmányban (egy 2010-es átlagos autóban) legalább 64 % acél található [2].

2. Szilárdság szerinti acélcsoportosítás

A tervezők (és bizonyos mértékig a felhasználók) számára a legfontosabb információ az acél szilárdsága. Az acélok szilárdság szerinti csoportosítására történelmileg több fogalom (nagyszilárdságú; növelt folyáshatárú; nagyszilárdságú, alacsonyán ötvözött (HSLA)) terjedt el, amelyek ma már elavultak, vagy értelmezési zavarok miatt félrevezetőek. A 20. század végén például a 355 MPa-t meghaladó folyáshatárú acélok nagyszilárdságúnak számítottak, és pl. a hídépítésben vagy más élenjáró hegesztett szerkezeteknél is nehezen terjedtek a 420 és 460 MPa szilárdság-kategóriájú acélok.

A nagy változást részben a saját tömeg csökkentésére irányuló törekvések (önmozgó vagy szállított szerkezetek, mint a közúti járművek, daruk, földmunkagépek, hadiipari termékek), részben a megnövekedett acéligény és a gyártókapacitások közötti egyensúly megbomlása (Kína, Korea, India acéléhsége [1, 4, 5]) indította el. Soha nem látott mértékben gyorsult fel az acélok (főként a hegesztett szerkezetek acéljainak) szilárdságnövelése.

Jó példa a szilárdságnöveléssel együtt járó tömegcsökkenésre, hogy a világ dinamikusan növekvő autógyártása ellenére az autóipar által igényelt és felhasznált acélmenyiség mértékadó prognózisok szerint a következő 10 évben a jelenlegi évi 120 millió tonnában állandósul [2]. Ez a mennyiség hozzávetőlegesen a világ egy havi acéltermelésével, vagy Kína évi acéltermelésének kétszeresével egyenlő [5].

Érdekes vonás, hogy a közelmúltban a szilárdságnövelést már nem a drága makroötvözéssel kívánták megoldani, hanem mindenekelőtt az acélokra vonatkozó fémteni ismeretek széleskörű felhasználására, a kikészítési technika fejlesztésére (üstmetallurgia, mikroötvözés, zárványalak szabályozás, vákuumozás) mellett új gyártástechnológiai

elvek (termomechanikus kezelések, szemcsefinomító és nemesítő, vagy kvázinemesítő hőkezelések) alkalmazására (vagyis olcsóbb megoldásokra) törekedtek [3]. Az eredményül kapott acélstruktúra a hegesztési folyamatban károsodik és későbbiekben nem reprodukálható, ezért a hegeszthetőséget a karbontartalom alacsony értéken tartásával, az egyenértékű karbontartalom korlátozásával, a szennyezőtartalom erőteljes csökkentésével és az alkalmazható falvastagság felső határának limitálásával kívánták javítani [4].

Az acélok szilárdság szerinti csoportosítására ma még nincs egységes álláspont. Ilyen csoportosítási rendszer megalkotása az acélgyártásban mértékadó országok földrajzi elhelyezkedése, az SI-től eltérő mértékegységek használata, felfogásbeli különbségek (tudományos iskolák

eltérései) és a gyorsan változó acélválaszték miatt nagy nehézségekbe ütközik. Az is problémás, hogy a szilárdsághatárok elméleti jellemzőkhöz nem, vagy csak áttételesen köthetők, ezért a határértékek különféle megfontolásokra hivatkozó deklaráción alapulnak.

2.1. Konvencionális acélok és konvencionális nagyszilárdságú acélok

Az egységes és széles körben elfogadott szilárdságcsoportosítás hiányában a konvencionális [*conventional*] jelzővel különböztetjük meg az ebbe a körbe tartozó acélokat az újonnan fejlesztett, korszerű [*advanced*] acéloktól). A hegeszthető acélok csoportosítására az 1. táblázatban bemutatott, az amerikai szilárdságegységben kifejezett határokat is figyelembe vevő javaslatot tesszük.

Szilárdsági osztály	Angol rövidítés	Szakító-szilárdság R_m , MPa	Szakító-szilárdság R_m , ksi	Folyáshatár $R_{p0.2}$ MPa	Anyag-konstans $k_m = R_m \cdot A_1$
Kis-szilárdságú acél	LSS	250-400	<60	<275	10000
Közepes-szilárdságú acél	MSS	400-600	60-90	275...500	10000
Nagy-szilárdságú acél	HSS	600-1200	90-180	500...1000	10000
Ultra-nagy-szilárdságú acél	UHScS	1200-	>180	>1000	10000

1. táblázat: A konvencionális acélok szilárdsági osztályai

2.2. Elsőgenerációs korszerű nagyszilárdságú acélok

A jól ismert és régóta felhasznált konvencionális nagyszilárdságú acéloktól (amelyeket közismertségüknek fogva legtöbbször a konvencionális jelző nélkül emlegetünk) a korszerű (nagyszilárdságú) acélokat az különbözteti meg, hogy fejlesztésükkor a tervezési (szilárdsági) követelmény mellett a gyártásra való alkalmasságra (adott esetben a szakadási nyúlással jellemzett alakváltozóképessegre) is kiemelt figyelmet fordítottak [6].

A fém(ötvözet)ek közöttük az acélok) általános tulajdonsága, hogy a szilárdsággal fordított arányosan csökken az alakíthatóságuk, vagy más szóval képlékenységük. Ha a szilárdsági jellemzőnek a szakítószilárdságot (R_m), alakváltozási jellemzőnek az l jeltávon (l jeltáv egyezményesen 80 mm, vagy a próbatest átmérőjének ötszöröse, illet-

ve tízszerese) mért (százalékos) szakadási nyúlást (A_l) választjuk, akkor jó közelítéssel:

$$R_m \cdot A_1 = \text{const} \quad (1)$$

Nevezzük az acélcsoportha jellemző állandó értéket anyagkonstansnak és jelöljük k_m -mel:

$$R_m \cdot A_1 = k_m \quad (2)$$

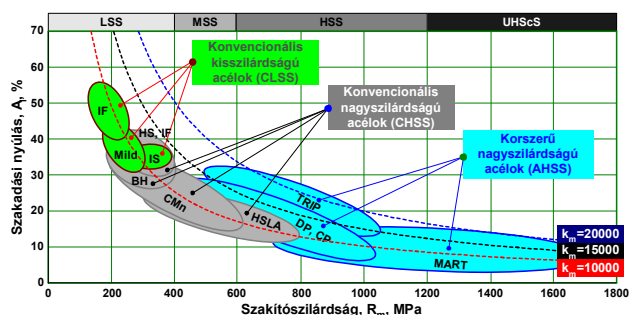
Az ábrázolásnál szokásos A_1 - R_m síkon egy hiperbolikus függvényt kapunk eredményül:

$$A_1 = \frac{k_m}{R_m} \quad (3)$$

A [7] diagramját alapként felhasználó 1. ábrán jól látható, hogy a különféle acélcsoporthoz az A_1 - R_m síkon a (3) összefüggést követő hiperbolikus sávban helyezkednek el. (A különféle acélok angol nevét és rövidítését a 2. táblázat tartalmazza).

Jel	Acéltípus	Jel	Acéltípus
IF	Interstitial Free	CMn	Carbon Manganese
MILD	Mild	HSLA	High Strength Low Alloy
IS	Isotropic	DP-CP	Dual Phase - Complex Phase
BH	Bake Hardened	TRIP	Transformation Induced Plasticity
IF-HS	Interstitial Free -High Strength	MART	Martensitic

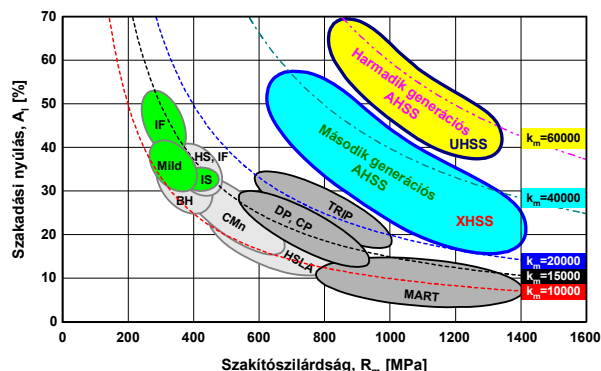
2. táblázat: A konvencionális kisszilárdságú (fekete), a konvencionális nagyszilárdságú (zöld) és a korszerű nagyszilárdságú acélok (kék) jelölései



1. ábra: Különböző konvencionális és korszerű nagyszilárdságú acélok a szakadási nyúlás - szakítószilárdság diagramban

Nagyszámú acélminőség statisztikai feldolgozásával úgy találták, hogy a konvencionális acéloknak az anyagkonstans jó közelítéssel és kerekítéssel 10000 MPa % értéket vesz fel. Szemléltetésként az 1. ábrába berajzoltuk a 10000, 15000 és 20000 MPa %-hoz tartozó k_m görbéket. Az ábra arról tanúskodik, hogy a konvencionális kis-, közepes-, nagy- és ultranagy-szilárdságú acélok a 10000-es hiperbolán helyezkednek el. A korszerű acélok közül a MART acélok mezejének középvonala ugyanerre a 10000-es hiperbolára illeszkedik, ugyanakkor DP-CP acélok a 15000-es görbéhez, a TRIP acélok a 20000-es görbéhez közel helyezkednek el.

Chung és Kwon láthatóan ugyanazt a forrásdiagramot felhasználva a DP és CP acélokat a 2. ábrán látható módon a 15000-es, a TRIP acélokat a 20000-es hiperbolára helyezi el [8]. A különbségek egyik fő forrása az időközben az acélgártásban bekövetkezett fejlesztésekben, másik a próbatetek jeltávolságának eltéréseiben kereshető: a rövidebb jeltávon mért szakadási nyúlások általában (minden olyan esetben, amikor a szakadási helyen az egyenletes nyúlást meghaladó nyúlás jön létre) nagyobbak, mint a hosszabb jeltávhoz tartozók. A probléma csökkenne, ha mindenütt 10 mm-es próbatest-átmérőt és azonos (pl. 80 mm hosszúságú) jeltávot használnának.



2. ábra: A második ($k_m=40\ 000$) és harmadik generációs ($k_m=60\ 000$) korszerű nagyszilárdságú acélok a szakadási nyúlás - szakítószilárdság diagramban

A 2. ábrán a kisszilárdságú acélok (LSS, világoszöld) és a konvencionális nagyszilárdságú acélok (CHSS, világoszürke) szín szerint is elkülönülnek az elsőgenerációs nagyszilárdságú acéloktól (AHSS, sötétszürke). Ebben a vonatkozásban a jelölés meglehetősen következtetlenség, mivel a k_m anyagállandóra alapozott osztályozási rendszerben a $k_m=10\ 000$ -es hiperbolán elhelyezkedő martensites (MART) acélok nem nevezhetők *korszerűnek*; ezek valójában az újonnan (legalábbis a jól ismert HSLA acélok után) kifejlesztett *konvencionális*, nagyszilárdságú acélok (CHSS) kategóriájába kellene, hogy tartozzanak.

A $k_m=15000$ -es és a $k_m=20000$ -es hiperbola (az 1. ábrán encián színű) acéljai a konvencionálishoz viszonyítva növelt képlékenységgel rendelkeznek, ezért ezeket már joggal nevezhetjük *korszerűnek*. Feltehető, hogy néhány év múlva, amikor a korszerű nagyszilárdságú acélok második és harmadik generációja már minden bizonnyal több acélcsaládot fog tartalmazni és elterjedtebb lesz, valószínűleg, mint *kvázi korszerű nagyszilárdságú acélok*, vagy mint *átmenet a korszerű nagyszilárdságú acélok felé* elnevezést fogják reálisnak tartani.

A rendszerezési szempont következetes alkalmazása azt követeli, hogy az előző két bekezdésben megnevezett acélokat (vagyis a HSLA acélok után kifejlesztett minden olyan acélt, amelyek nagyszilárdságúak és anyagkonstansuk nem haladja meg a $k_m=20\ 000$ -t, elsőgenerációs nagyszilárdságú acél (AHSS) csoportnévvel különböztessük meg.

2.3. Második és harmadik generációs korszerű nagyszilárdságú acélok

A valódi korszerű nagyszilárdságú acélok a $k_m=40\,000$ -es (második generációs, vagy extra-nagyszilárdságú acélok) és a ma még kissé utópisztikus $k_m=60\,000$ -es (harmadik generációs, vagy ultra-nagyszilárdságú acélok) hiperbolá-

hoz tartoznak. Mindkét acélcsoport tagjai a szilárdságukhoz képest igen nagy (az első generációs korszerű nagyszilárdságú acélokhöz viszonyítottan legalább kétszeres, illetve háromszoros) alakváltozóképeséggel (szakadási nyúlással) jellemezhetők (3. táblázat).

Szilárdsági osztály	Angol rövidítés	Szakító-szilárdság R_m , MPa	Szakító-szilárdság R_m , ksi	Folyáshatár $R_{p0.2}$, MPa	Anyag-konstans $k_m=R_m \cdot A_1$
Második generációs (extra-nagyszilárdságú) korszerű acélok	XHSS	600-1400	90...200	500...1300	40000
Harmadik generációs (ultra-nagyszilárdságú) korszerű acélok	UHSS	850-1400	120...200	700...1300	60000

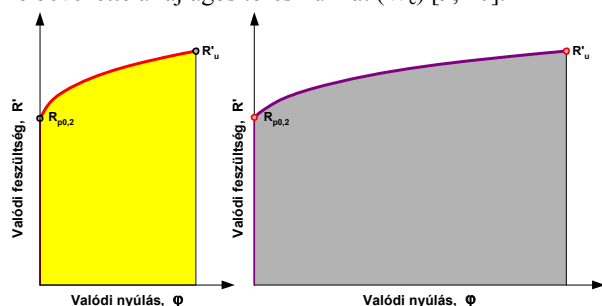
3. táblázat: A korszerű nagyszilárdságú acélok (AHSS) második és harmadik generációja

Ez a nagy képlékenység az acéloktól szinte elképzelhetetlenül szokatlan és a háttérben valós 21. századi elméleti felfedezések és acélgépjártási innovációk sorozata kell, hogy álljon.

3. A k_m anyagállandó fizikai tartalma

A korszerű nagyszilárdságú acélok kifejlesztését az autóipari gyártók kezdeményezték abból a célból, hogy a nagy szilárdság mellett az acélok egyidejűleg (képlékenyen) jól alakíthatók is legyenek. Ez a törekvés járulékosan egy újabb fontos anyagtulajdonság javulásával is járt. Ennek bizonyítására a 3. ábra szolgál.

Az ábra azt mutatja, hogy azonos szilárdságú, de különböző szakadási nyúlású acélok esetében a $R'-\varphi$ síkon a függvénygörbe alatti terület nagyon különböző, vagyis a próbatetek töréséig különböző munkát kell az acél próbatestbe bevezetni. Ebből a tényből kiindulva az 1960-as évek elején Gillemot az acélok szívósságának jellemzésére bevezette a fajlagos törésmunkát (W_c) [9, 10].



3. ábra: Azonos szilárdságú, eltérő alakváltozóképeségű acélok valódi feszültség-valódi (maradó) nyúlás diagramja. A függvénygörbék alatti terület a fajlagos törésmunkával arányos

A fajlagos törésmunka (J/cm^3 mértékegységgel) a bemetzés nélküli, sima szakító próbatest esetében a külső erők egységnyi térfogatra vonatkoztatott munkáját jellemzi a szakadás helyén. Az állapotjellemzőktől (hőmérséklet, terhelési sebesség, feszültségállapot) függő fajlagos tö-

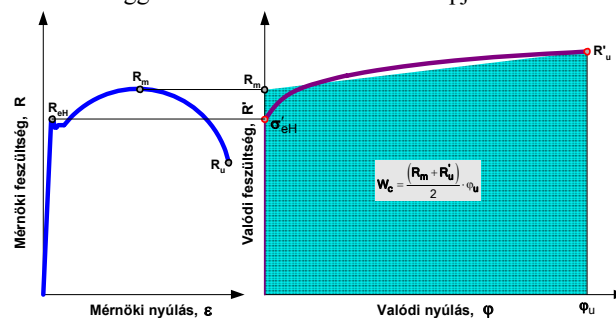
résmunka az anyag szívósságát jellemző szerkezet-érzékenlen mérőszám [11]. Szakító próbatestnél ez a munka jó közelítéssel megegyezik a képlékeny alakváltozási munkával, amely a következő összefüggéssel számítható:

$$W_c = \int_{L_0}^{L_u} \frac{F \cdot dL}{V} = \int_{L_0}^{L_u} \frac{F \cdot dL}{S \cdot L} = \int_{\varphi=0}^{\varphi_u} R' \cdot d\varphi \quad (4)$$

A (4) összefüggés ténylegesen a valódi feszültség - valódi nyúlás diagram alatti területet jelenti, amit numerikus integrálással vagy planimetrálással lehet pontosan meghatározni. Közelítő számítására több módszer ismert, amelyek közül itt most a legegyszerűbbnek látszó Markovec féle összefüggést emeljük ki [12]:

$$W_c = \frac{(R_m + R'_u)}{2} \cdot \varphi_u \quad (5)$$

Az összefüggés származtatása a 4. ábra alapján követhető.

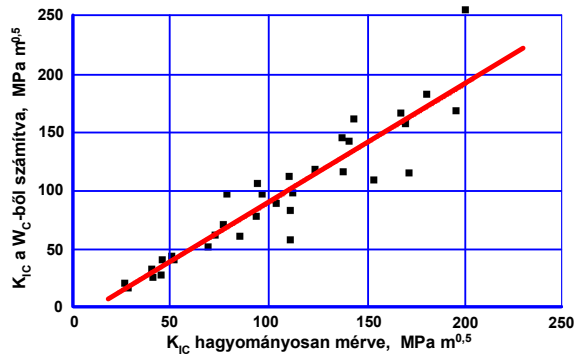


4. ábra: A fajlagos törésmunkával arányos diagram alatti terület és közelítése

A 4. ábra bal és jobb oldali részét és a görbe alatti területet megadó integrálokat összehasonlítva látható, hogy a mérnöki feszültség-mérnöki nyúlás diagram alatti terület nem egyezik meg a valódi feszültség-valódi nyúlás diagram alatti területtel, de mivel a kétféle feszültség és a kétféle nyúlás között matematikai összefüggés áll fenn, a mérnöki rendszer diagramja alatti terület arányos a törésmunkával. További közelítéssel a diagram alatti

terület az $R_m \cdot A_f$ szorzattal vagyis a k_m anyagállandóval helyettesíthető. Ezzel kimondható, hogy az anyagállandó és a fajlagos törésmunka között szoros kapcsolat áll fenn, tehát az acélok anyagállandója egyféle szívóssági mutatónak fogható fel.

Gillemot L. munkatársai (Czoboly, Havas, Gillemot F.) kimutatták, hogy a fajlagos törésmunka és egyes törésmechanikai mérőszámok között bizonyos körülmények között szoros kapcsolat van [10]. Az 5. ábra szerint pl. a fajlagos törésmunka és a K_{IC} törési szívósság között lineáris regresszió áll fenn.



5. ábra: A fajlagos törésmunkából számított és a hagyományosan mért K_{IC} értékek összehasonlítása

4. A fajlagos törésmunka és a töréskeresztek

A fajlagos törésmunka az anyagok képlékeny töréséhez tartozó jellemző. Könnyen belátható, hogy a komplett autók, vagy az autók főelemeinek töréskeresztjének (ahol a képlékeny törés dominál) eredménye a tervezési megoldásokon (mechanikai oldal) kívül nagymértékben függ az ütközéssel károsított anyagok fajlagos törésmunkájától (anyagoldal). Az ütközéskor az autózás fő szerkezeti elemei rugalmasan, majd képlékenyen deformálódnak, miközben az alakváltozáshoz szükséges energiát elnyelik. Mivel az előzőekben bemutatott gondolatmenet szerint a k_m anyagjellemző a (nem-rugalmas) törésmunkával összefüggésben van, ezért a korszerű anyagok szerkezeten belüli ütközési viselkedésének előzetes jellemzésére és ezen túlmenően acélfejlesztési és anyagkiválasztási szempontként használható fel.

5. A korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztési viselkedése

Az acélok fejlesztésekor az elsődleges cél a szilárdságnövelés volt, amihez az autógyártási igények kielégítésére a jövőben kifejlesztendő korszerű nagyszilárdságú acélok (XHSS és UHSS) esetében az alakíthatósági szempontot párosították. Az is látható, hogy csak azoknak a korszerű acéloknak van/lesz sikere, amelyek a piac által elfogadható költséggel gyárthatók.

Ugyanakkor azt is látni kell, hogy a konvencionális nagyszilárdságú és a korszerű nagyszilárdságú acélok fejlesztésekor a fő (gazdasági és mechanikai) szempontok mellett

a jó hegeszthetőség biztosítása annak ellenére is csak másodlagos volt, hogy ezeket az acélokat hegesztett szerkezetekben (elsősorban önjáró és mozgatott szerkezetekben) alkalmazzák.

Milyen hegeszthetőségi nehézségekkel kell számolnunk ezeknek az acéloknak a hegesztésekor?

1. A konvencionális nagyszilárdságú acélok alacsony képlékenységi tulajdonsága fokozott repedésveszélyt prognosztizál, ami a hegesztőmérnökök rémálma és elhárítása költséges és fegyelmezett gyártást igényel (előmelegítés, szabályozott hűlésidő, húzott varratok, rétegek közötti hőmérséklet, minőségfelügyelet, személyi és berendezési feltételek). A korszerű nagyszilárdságú acélok nagyobb nyúlásából eredően ez a probléma előre láthatóan mérsékeltebb lesz.

2. Az acélgyártók minimális makro- és mikroötvöztetés mellett összetett gyártási technológiával (szabályozott (hengerlési) megalakítás és bonyolult hőkezelések) operálnak, amelyeknek az eredménye olyan instabil anyagszerkezet (szemcse- és szövetszerkezet, rácshibák), amelyet az egyes sorokhoz tartozó hegesztési hőciklusok többnyire rossz irányba változtatnak és ezek a változások sem a hegesztés során, sem a hegesztés után nem állíthatók vissza.

3. Az exogén ömlesztő hegesztés hozaganyagai a hegesztés során megolvadnak, majd kristályosodnak, ezért ugyanazon az elven nem gyárthatók, mint az alapanyagok. A hozaganyagok megfelelő szilárdsági és főként képlékenységi jellemzői csak az alapanyagét jóval meghaladó makro- és mikroötvöztetéssel érhetők el, ami nem csak drága megoldás, de a hegesztett kötésben szükségszerűen olyan heterogenitást okoz, amelynek következményeit ma még nehéz előre látni.

Összességében az alapanyagok és a hegesztésükhöz alkalmazott hozaganyagok összehangolása (*matching*) sem ígérkezik könnyű feladatnak. Valószínűleg felértékelődik az *undermatching* elven történő hozaganyag-választás. Ennek a kérdésnek a megnyugtató megoldása további kiterjedt és intenzív kutatásokat igényel, amire a türelmetlen felhasználók aligha hajlandók elegendően hosszú időt biztosítani.

6. Összefoglalás

Az autóipar újkeletű versenyképességi, élet- és környezetvédelmi igényeinek (tömegcsökkentés, károsanyag-kibocsátás mérséklése, hulladékhasznosítási lehetőség, töréskeresztek) kielégítésére új típusú acélokat fejlesztettek ki és terveznek kifejleszteni. Az új acélok rendszerezése terén kaotikus állapotok uralkodnak, ezért a tisztánlátás érdekében az alábbiakban egy következetes osztályozásra teszünk javaslatot. Felhívjuk a figyelmet arra is, hogy az alapvetően hegesztett szerkezetek gyártására szánt acéloknál a hegesztési szempontokat nem (eléggé) vették figyelembe, ezért a beépítésük során komoly, (részben megoldhatatlan) hegeszthetőségi problémákkal kell szembenézni.

1. Konvencionális acélok (*Conventional steels*, CS) azok az acélok, amelyek k_m anyagállandójának középértéke 10 000. A konvencionális acélokon belül szilárdsági szempontból kis-, közepes, nagy- és ult-

ra-nagyszilárdságú acélokat különböztetünk meg. A szilárdsági határok rendre: 400, 600 és 1200 MPa, illetve angolszász egységben 60, 90 és 180 ksi.

2. Első generációs korszerű nagyszilárdságú acélok (AHSS) azok az acélok, amelyek szakítószilárdsága meghaladja a 600 MPa-t (90 ksi) és a k_m anyagállandójuk középtételekben 15 000 vagy 20 000.
3. Második generációs korszerű nagyszilárdságú acéloknak vagy extra nagyszilárdságú acéloknak (XHSS) nevezik azokat az acélokat, amelyek szakítószilárdsága meghaladja a 600 MPa-t (90 ksi) és a k_m anyagállandójuk középtételekben 40 000.
4. Harmadik generációs korszerű nagyszilárdságú acéloknak vagy ultra-nagyszilárdságú acéloknak (XHSS) nevezik azokat (a ma még kissé utópisztikus) acélokat, amelyek szakítószilárdsága meghaladja a 600 MPa-t (90 ksi) és a k_m anyagállandójuk középtételekben 60 000.
5. A korszerű nagyszilárdságú acélok mindhárom generációjának (AHSS, XHSS és UHSS) kiemelkedően nagy alakíthatósága a konvencionális acélokhoz viszonyítva egyúttal kiváló szívósságot is eredményez. Ennek bizonyítására a szakítódiaagram alatti terület, a fajlagos törésmunka és a törésmechanikai jellemzők közötti korreláció szolgál.
6. A különböző anyagállandójú korszerű nagyszilárdságú acélokat eredendően nem a hegesztési szempontok szerint fejlesztették, ezért hegeszthetőségük (főként vastagabb szelvények esetében) elméleti és gyakorlati nehézségekbe ütközik. Előbbi az alapanyag eredeti állapotának megolvadás utáni reprodukálhatatlanságában, utóbbi a megfelelő hozaganyagok hiányában és a költséges és körülményes technológiai fogások elkerülhetetlen szükségességében nyilvánul meg.

7. Köszönetnyilvánítás

A cikkben 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.

8. Irodalom

- [1] Balogh A.; Török I.; Gáspár M.; Juhász D.: Present state and future of advanced high strength steels Journal of Production Processes and Systems (Publication of the University of Miskolc), Volume 5 (May 2012), No 1. p.: 79-90.
- [2] Blain, P.: Steel Perspectives for the automotive industry Steel & Automobile, Lutsey, May 31, 2012.
- [3] Balogh A.; Prém L.: Az acélminőség, a hidegalakítási mérték és a ponthegesztési technológia egymásra hatása Hegesztéstechnika, XXIV (2013), 1. szám, p.: 41-47.
- [4] Balogh A.; Gáspár M.: Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója Hegesztéstechnika, XXIII. (2012), 3. szám, p.: 23-28.
- [5] World Steel Association: Steel Production 2012 www.worldsteel.org
- [6] International Iron and Steel Institute.: Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines. Version 3. September, 2006. www.wordautosteel.org
- [7] World Steel Association: Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines. Version 4.1., June, 2009. www.wordautosteel.org
- [8] Chung, J.; Kwon, O.: Development of high performance auto steels at POSCO steels Proc. of the 9th ICTP Conference, Gyeongju-Korea, September 7-11. 2008. p.: 3-8.
- [9] Tóth L.: A törésmechanika modelljei és gyakorlati alkalmazásai Anyagvizsgálók Lapja (válogatás), 2012. p.: 27-42.
- [10] Czoboly E.; Havas I.; Orbulov I. N.: Törési vizsgálatok a BME Mechanikai Technológia Tanszéken Anyagvizsgálók Lapja (válogatás), 2012. p.: 43-45.
- [11] Gillemot L.: Anyagszerkezettan és Anyagvizsgálat Tankönyvkiadó, Budapest, 1967.
- [12] Tisza M. (szerk): Anyagvizsgálat Miskolci Egyetemi Kiadó, 2008.

FERRIT-MARTENSITES (DP) ACÉL VÉKONYLEMEZEK ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTHETŐSÉGE

RESISTANCE SPOT WELDABILITY OF FERRITE-MARTENSITE (DUAL-PHASE) STEEL SHEETS

Dr. Balogh András*

Prém László**

ABSTRACT

Due to the material development taking place in the last four decades application of advanced high strength steels (AHSS) has come to the front in automotive industry. From the viewpoint of industrial use the ferritic-martensitic (so called dual phase, DP) steels stand in first place among the different AHSSs. Because of the varied chemical composition and the dissimilar manufacturing procedures, the mechanical properties of the DP steels to be spot welded change in relatively wide interval, the weldability of these steels can be very different. In this paper the resistance spot weldability of DP 600, DP 800, DP 1000 AHSS grades made by the Swedish Company SSAB are investigated.

1. Bevezetés

Az egyre kisebb üzemanyag-fogyasztás iránti igény, az üvegházhatást kiváltó gázok kibocsátására vonatkozó nemzetközi környezetvédelmi előírásoknak való megfelelés, valamint az acélfelhasználás csökkentése és az újrahasznosíthatóság miatt az autóipar rákényszerült, hogy egyre kisebb önsúllyal rendelkező gépkocsikat gyártson. A szóba jöhető rivális anyagokhoz (alacsonyabb sűrűségű fémek és nemfémek) viszonyítottan kiváló szilárdsági és alakváltozási jellemzőkkel rendelkező korszerű nagyszilárdságú acélok (AHSS) alkalmazása révén lehetőség nyílik a célként megfogalmazott önsúlycsökkentés megvalósítására.

2. A konvencionális és korszerű nagyszilárdságú acélok

Az autóipari vékony acéllemezek hagyományosan alacsony szilárdságú (LSS), de hideg képlékeny alakítással jól feldolgozható acélból készültek. Az 1. ábrán ilyen az IF, a Mild és az IS jelű acél, jellemzően 275 MPa alatti folyás- és 400 MPa alatti szakítószilárdsággal [1].

A járműipar generálta szilárdságnövelési igény hatására az ezredforduló előtti évtizedekben (hozzávetőlegesen 1970 után) megjelentek a valójában közepes szilárdságú (MSS) [2, 4], de abban az időben a jobban hangzó nagyszilárdságú névvel illetett acélok, amelyeket ma konvencionális nagyszilárdságú acélokként (CHSS) emlegetnek. Az 1. ábra szerint ide tartoznak az IF-HS, a BH, a CMn és a csoport legismertebb tagjaként a HSLA acélok [1].

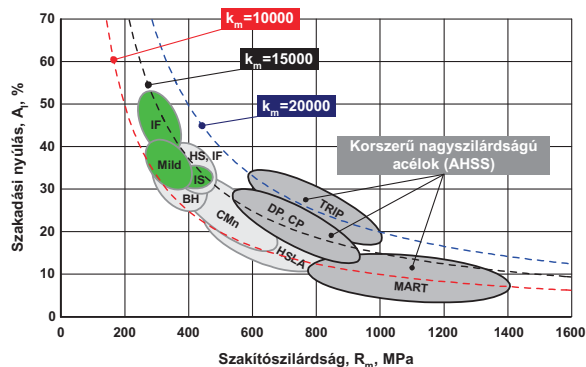
A modern jelzőt a nagyszilárdságú acélok elé akkor ragasztották, amikor a korábbi ferrit-perlites acéloktól eltérő szöveteket (bainit, martensit, maradék austenit) tartalmazó, a korábban ismertekhez mérten nagyobb szilárdságú acélokat állítottak elő (MART). A korszerű nagyszilárdságú acélok további típusai (DP-CP, TRIP) azonos szilárdság mellett nagyobb szakadási nyúlásukkal tűntek ki. Az acélok jelenlegi szilárdsági kategorizálása szerint a DP-CP, TRIP és MART acélokat elsőgenerációs nagyszilárdságú acéloknak nevezik, megkülönböztetve a második generációs extra nagyszilárdságú acéloktól (XHSS), és a harmadik generációs ultra-nagyszilárdságú acéloktól (UHSS) [3, 4].

A szilárdság és alakváltozóképeség együttes jellemzésére a k_m anyagkonstans szolgál, amelyet a szakítószilárdság (R_m , MPa) és a szakadási (maradé) nyúlás (A_1 , %) szorzataként definiálnak [2, 4, 5]. Az 1. ábra jól szemlélteti, hogy egy adott anyagkonstanshoz (pl. $k_m=10\,000$ -hez) tartozó acélok az $A_1 - R_m$ síkon egy hiperbolára illeszkednek. A DP-CP acélok a $k_m=15\,000$, a TRIP acélok a $k_m=20\,000$ -es hiperbolán elhelyezkedve a speciális autóipari igényeket (törésig elnyelt energia magas értéke és nagymértékű hitegalakíthatóság) kielégítve az acélok új kategóriáját képviselik, amelyre valóban ráillik a korszerű (*advanced*) jelző.

Az AHSS acélok további előnye, hogy az $R_{p0.2} / R_m$ hányadosuk lényegesen kedvezőbb (kisebb), mint a konvencionális nagyszilárdságú acéloké (BH, HSIF, CMn, HSLA), ezért ezeket az acélokat nagyobb alakváltozási tartalék, és ennek következményeként kisebb repedési hajlam jellemzi. A nagyobb szilárdság és alakíthatóság révén a napjainkban egyre jobban felértékelődő töréstezteken is jobban szerepelnek, mint a konvencionális nagyszilárdságú (CHSS) acélok.

* egyetemi docens

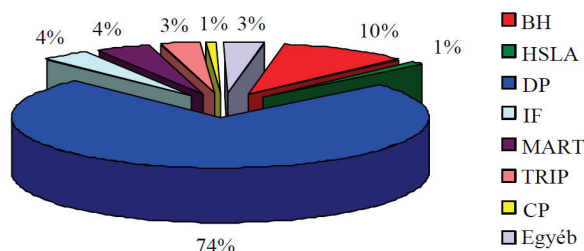
** PhD hallgató



1. ábra: Az első generációs korszerű nagyszilárdságú acélok a szakadási nyúlás (A_l) - szakítószilárdság (R_m) diagramban

Az AHSS acélok minden esetben heterogén szövetszerkezetűek (az angol nyelvű szakirodalomban elterjedt többfázisú kifejezés azért megtévesztő, mivel az egyszerű lágycélok (Mild, IF, IS) is többfázisúak), a ferrit-perlites acéloktól eltérően általában szívós ferrit mátrixba ágyazott kemény martensit szigeteket, esetenként bainit és/vagy maradó austenit tartalmaznak olyan mértékben és kombinációban, melyekkel a kívánt mechanikai tulajdonságok elérhetőek.

Az UltraLight Steel Auto Body (ULSAB-AVC) program keretében végzett kutatás eredményeként megállapították, hogy egy személygépkocsi karosszériájának 85%-nál lehet AHSS acélokat használni, és ezáltal egy átlagos alapmodellhez képest akár 25%-os önsúlycsökkentést is el lehet érni, anélkül, hogy a gyártási költségek lényegesen növekednének [1].



2. ábra: LSS, CHSS és AHSS acélok alkalmazási részaránya egy korszerű személygépkocsiban

A 2. ábrán jól látható, hogy egy korszerű személygépkocsi karosszériájának gyártása során használt acéltípusok közül a ferrit-martensites szövetszerkezetű DP acélok abszolút túlsúlyban vannak.

3. Ferrit-martenzites szövetű (DP) acélok

A Dual-Phase acél elnevezést a Single-Phase-nek vélt lágycéloktól (LSS) a heterogén szövetszerkezet hangsúlyozására először a japán Hayami és Furukawa használta [6] és az elnevezés pontatlansága ellenére gyorsan elterjedt és általánosan használttá vált.

A DP-acélok ferrit mátrixba ágyazott, finom, diszperz eloszlású, kemény martensit szigeteket tartalmaznak. A vegyi összetétel, ezen belül elsősorban a karbontartalom és

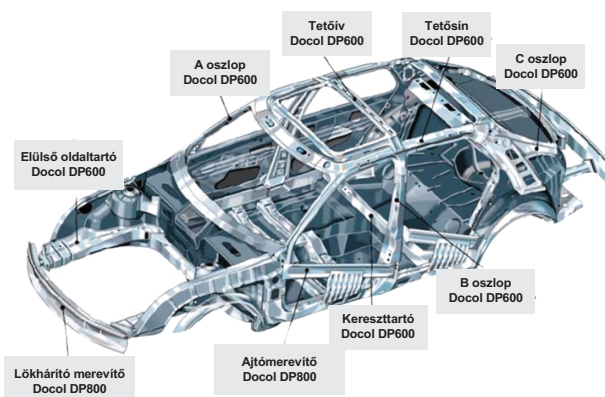
a hűtési sebesség szabályozásával a martensit aránya 20...70 % között változtatható [7]. Ebből adódóan a kereskedelmi forgalomban jelentősen eltérő szilárdsággal és alakváltozó képességgel rendelkező DP acélok kaphatóak, mivel az ötvözetartalom mellett a martensit mennyisége, mérete és eloszlása alapvető befolyással bír ezen acélok mechanikai tulajdonságaira. A lágycélok a jó alakíthatóságot biztosítja, míg a kemény martensit az acél szilárdságát növeli. Ezt a heterogén szövetszerkezetet általában folyamatos hőkezeléssel (áthúzó kemencében, vagy sófürdőben), vagy a meleg hengerlést követő szabályozott lehűtéssel állítják elő [2].

A hőkezelések mindegyikének az a lényege, hogy az A_1 ... A_3 hőmérséklet-közben (az ún. interkritikus hőmérséklet-közben), azaz az $\alpha+\gamma$ mezőben kialakítják a kívánt ferrit/austenit szövetarányt. Ilyenkor az apró austenit krisztallitokat a jól alakítható ferrit krisztallitjai zárják körül. A nagyobb karbon-oldóképességű austenit krisztallitok C-tartalma ezen a hőmérsékleten jóval meghaladja az átlagos értéket, ami a belőle keletkező martensit keménységének növelését eredményezi. Amikor az interkritikus hőmérsékletre az acélt gyorsan hűtik, az átalakulás során az austenitből martensit keletkezik [4]. A DP acélok gyártása során a legnagyobb eltérést az acél normális edzéséhez képest az jelenti, hogy az austenitesítés csak részleges, ezért az austenit krisztallitokat ferrit veszi körül. A martensit keletkezésével együtt járó fajtérfogat-növekedés a ferritben (elsősorban a keletkező martensit-szigetekkel szomszédos tartományokban) képlékeny alakváltozást okoz. Ennek következtében a ferritben a diszlokációsűrűség jelentősen megnő.

A DP acélok igen nagy szakítószilárdsággal ($R_m = 500 \dots 1000$ MPa), jó szívóssággal, valamint viszonylag jó alakíthatósággal ($A_{80} = 15 \dots 30$ %), és nagy sebességű alakváltozás esetén kiváló energiaelnyelő képességgel rendelkeznek. Az összetartozó határértékekből számítsuk ki az anyagállandó [4, 5] értékét:

$$k_m = R_m \cdot A_l = 500 \cdot 30 = 15000 \text{ MPa} \% \quad (1)$$

$$k_m = R_m \cdot A_l = 1000 \cdot 15 = 15000 \text{ MPa} \% \quad (2)$$



3. ábra: A DP típusú Docol acélok alkalmazása egy modern személygépkocsi body in white egységében

Ezekből az igen előnyös tulajdonságokból következik, hogy a DP acéltípusból elsősorban a gépkocsik lökhárítói, A, B és C oszlopai, valamint a karosszéria (ajtók, tető, stb.) különböző merevítő elemei készülhetnek, amelyek jelentős energiaelnyelési képességük folytán egy esetleges ütközéskor az utasok biztonságát hivatottak szolgálni. A 3. ábra a DP acélok alkalmazási lehetőségeit illusztrálja egy napjainkban gyártott korszerű gépkocsinál [8].

4. A kísérleti DP acélok

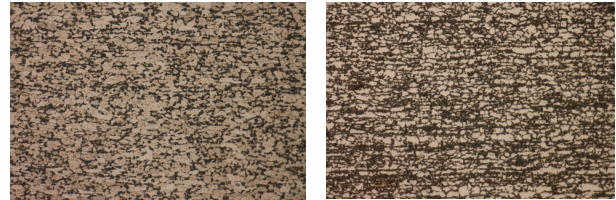
A hazai autógyári beszállító kis-és közép vállalkozások hegesztési tevékenysége a hagyományos lágyacélok mellett (pl.: DC01) elsősorban a ferrit-martensites szövettű anyagminőségre összpontosul, ezért a TÁMOP projekt keretében folytatott kutatásainkhoz kísérleti alapanyagként a Docol DP 600, DP 800, és DP 1000 márkajelű nagyszilárdságú vékonylemez választottuk. A márkajelben lévő szám az acél MPa-ban kifejezett szakítószilárdságára utal. A svéd SSAB-tól beszerzett finomlemez vastagsági mérete névlegesen 1,0 mm volt. A lemezeket a gyártó 2000 x 1250 mm-es táblaméretben, olajozott kivitelben szállította. A lemeztáblákat a nagy szilárdság miatt a szokásos táblaollós darabolás helyett számjegyzérlésű lézervágó berendezés segítségével vágtuk a vizsgálatokhoz szükséges méretre.

A Docol DP 600, DP 800, és DP 1000 acélok ponthegeszthetőségének vizsgálata során megvizsgáltuk az alapanyagok mikroszerkezetét (ferrit-martensit arány), roncsolásos anyagvizsgálati módszerekkel meghatároztuk a mec-

hanikai jellemzőket, spektrométeres vizsgálattal ellenőriztük a lemezek vegyi összetételét, amely alapján a hegeszthetőségük megítélését segítő karbonegyenérték kiszámítható volt.

4.1. A DP acélok mikroszerkezete

A rendelkezésünkre álló Docol DP 600, DP 800, és DP 1000-es alapanyagok ferrit-martensit arányának meghatározásához mikrociszolati próbatesteket munkáltunk ki, majd az elkészült csiszolatokat képelemző szoftver segítségével értékeltük.



4. ábra: A DP 600-as és a DP 1000-es alapanyag szövetképe. Nagyítás: 500x, Marószers: Nital

A 4. ábrán jól látható a világos színű ferritből és a sötét színű martensitből álló szövetszerkezet, valamint a szilárdságnövekedést okozó nagyobb martensit tartalom, a kisebb szemcseátmérő és az eltérő mértékű hidegalakítás. A képelemzés eredményeit összefoglaló 1. táblázatban jól látható a szilárdság növekedése és a martensit-arány közötti egyértelmű kapcsolat.

Megnevezés	Ferrit-arány (%)	Martensit-arány (%)	Átlagkeménység (HV0,2)
DP 600	65 %	35 %	235
DP 800	55 %	45 %	265
DP 1000	45 %	55 %	324

1. táblázat: Ferrit-martensit arányok változása eltérő szilárdságú DP acéloknál

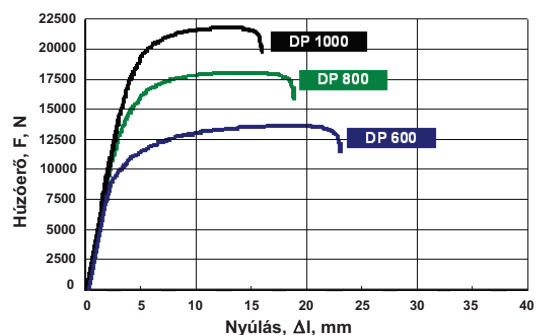
4.2. A DP acélok mechanikai jellemzői

A DP acélok nagy szakítószilárdságuk mellett szokatlanul jók a képlékenység mutatóik: szakítódiaagramjuk folytonos, nincs kifejezett folyáshatár, alakítási keménységük kivevőjük meglehetősen nagy, ami jelentős egyenletes nyúlásra utal, azonban mechanikai tulajdonságaikban kismértékű anizotrópia észlelhető [1, 2].

A kísérletekhez használt DP 600, DP 800 és DP 1000-es finomlemez mechanikai jellemzőit számjegyzérlésű elektrohidraulikus anyagvizsgálógépen szabványos körülmények mellett, szobahőmérsékleten határoztuk meg. A szakítóvizsgálat során gyűjtött összetartozó erő-elmozdulás értékpárokból megszerkesztett szakítódiaagramokat az 5. ábrán mutatjuk be. A szakítóvizsgálatból származó szilárdsági és képlékenységi anyagjellemzőket, a folyáshatár és a szakítószilárdság hányadosát, valamint az anyagállandót a 2. táblázatban összegeztük.

A szakítóvizsgálatok eredményei alapján egyértelműen megállapítható, hogy a szilárdság növekedésével a DP acélok folyáshatár és a szakítószilárdság közötti hányadosa folyamatosan növekszik, azaz a törésig rendelkezésre álló

alakváltozási tartalékuk csökken. A töréskereszttek szempontjából azonban megnyugtató az a tény, hogy ez az érték még a legnagyobb szilárdságú, DP 1000-es anyagminőség esetében is jóval kedvezőbb, mint a nagyszilárdságú, középvastag szerkezeti acélok (pl.: S960Q) esetében.



5. ábra: A kísérleti DP acélok szakítódiaagramjai

Anyagminőség	Mechanikai jellemzők					
	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A ₈₀ (%)	Z (%)	R _{p0,2} / R _m	k _m (MPa%)
DP 600	669	448	18,70	60,00	0,67	12500
DP 800	873	599	13,67	53,73	0,68	11950
DP 1000	1047	721	11,33	49,96	0,69	11850

2. táblázat: A DP acélok szilárdsági és képlékenységi jellemzői

4.3. A DP acélok vegyi összetétele

A DP acélok kémiai összetételét az alacsony karbontartalom, minimális ötvözttség és alacsony szennyezőtartalom (S, P, O, N) jellemzi. A DP típusú acélok átlagos C-tartalma 0,1...0,15 % körüli érték. Ahogy már korábban is említettük, a C-tartalom kiemelkedő jelentőséggel bír a DP acélok esetében, mivel a martensit adott térfogathányada mellett a szilárdság is alapvetően a C-tartalomtól függ. A C-tartalom növelésének hátránya, hogy rontja a hegeszthetőséget, csökkenti az ütőmunkát és növeli az átmeneti hőmérsékletet, ezért az ipari gyakorlatban a 0,15%-nél kisebb C-tartalmú DP acélok terjedtek el. A szilárdságnövelés céljából a DP acélok Mn tartalmát növelik. A Mn szokásos mennyisége 0,5-2,0 % koncentrá-

ció-tartományba esik, 1,5 % körüli leggyakoribb értékkel. A szilárdságnövelés és a kén megkötése mellett a Mn további fontos szerepe abban nyilvánul meg, hogy jelentősen csökkenti a fázisátalakulások kritikus hőmérsékleteit, ennek révén pedig könnyebben kézben tartható a ferrit/martensit térfogatarány [1]. A Mn mellett alkalmazott egyéb ötvözők, mint például a Cr, V, Mo, Si és Ni külön-külön, vagy valamilyen kombinációban tovább növeli az edzhetőséget. A karbidképző elemek, (Cr, Mo és V) alkalmazása gondos folyamatszabályzást igényel, ugyanis lehűlés közben ezek az ötvözők stabil karbidokat és nitrideket vagy karbonitrideket képeznek [2].

Anyagminőség	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Nb (%)	V (%)	B (%)
DP 600	0,098	0,20	0,81	0,015	0,002	0,014	0,01	0,0002
DP 800	0,129	0,20	1,52	0,014	0,003	0,015	0,02	0,0003
DP 1000	0,148	0,49	1,50	0,010	0,002	0,015	0,01	0,0004

3. táblázat: A kísérleti DP acélok vegyi összetétele tömegszázalékban

A 3. táblázatban a kísérleti DP acélok vegyi összetétele látható. Jól megfigyelhető, hogy a szilárdságot a gyártó elsősorban a szokásos C, Mn, és Si elemekkel növelte, a mikroötvözők közül a B tartalom szilárdságkategóriánként egy tízezred százalékkal növekszik, míg a további szemcsefinomító és nitridképző mikroötvözők (Nb, V) mennyisége anyagminőségtől függetlenül közel azonos. Figyelmet érdemel a szilárd fázisú szennyezők (S, P) nagyon alacsony koncentrációja, ami az ilyen típusú (alakításra és hegesztésre szánt) acéloknál kiemelt jelentőségű.

5. A különböző szilárdságú DP acélok ponthegeszthetősége

A hegesztéssel foglalkozó szakemberek körében kevésbé ismert, hogy az ellenállás-ponthegesztésnek is ugyanúgy megvannak a maga hegeszthetőségi feltételei, mint az ömlesztő hegesztéseknek. A ponthegesztésnél elvárás, hogy az előírt pontátmérőjű pontkötéseket reprodukálhatóan, repedésmentesen, az alapanyagra és a kötéstípusra jellemző terhelhetőséggel lehessen létrehozni.

A hegeszthetőség a sajtolóhegesztések közé tartozó ponthegesztés jellegzetességei (gyors hevítés, kisméretű hegfürdő, nyomóeszültség és az elektródok okozta intenzív hőelvonás alatti kristályosodás) miatt lényegesen különbözik az ívhegesztéseknél megszokottól [9]. A ponthegeszthetőség vizsgálati kritériumaként a kötések maximális keménységét és a pontkötések valamilyen vizsgáló eljárás-

sához kötött kedvezőtlen törési módjának megjelenését szokás megadni.

Az alapanyag kémiai összetételének a hatását az ömlesztő hegesztésekhez hasonlóan a ponthegeszthetőség vizsgálata során is a karbon egyenértékkel fejezhetjük ki. A (3) összefüggés egy ilyen karbon egyenértéket mutat, amelyet japán kutatók az autóipari AHSS acélok hegeszthetőségének minősítésére vezettek be. A 0,24 %-os határérték a kedvezőtlen törési mód megjelenési határát jelöli, ahol a kötések kereszt szakító és nyíró szakító erejének hányadosa csökkenni kezd [10].

$$CE_{RSW} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + 2 \cdot P + 4 \cdot S \leq 0,24 \% \quad (3)$$

A kísérleti lemezanyagok vegyi összetételéből a (3) összefüggés segítségével kiszámítottuk a karbon egyenértékeket, amelyeket a 4. táblázatban foglaltunk össze.

Anyagminőség	CE _{RSW} %
DP 600	0,18
DP 800	0,25
DP 1000	0,27

4. táblázat: A kísérleti DP acélok karbon egyenértékei

A 4. táblázat eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy a DP 600-as anyagminőség esetében kapott 0,18 %-os karbon egyenérték 25 %-kal alatta van a veszélyességi határnak, azonban a DP 800-as és a DP 1000-es acél vékonylemezek karbon egyenértékei meghaladják a 0,24 %-

os határértéket. Ez azt jelenti, hogy a DP 600-as acél ponthegesztett kötéseinél hegesztési nehézségekkel és a kötés romló mechanikai jellemzőivel még nem kell számolnunk, azonban a DP 800-as és DP 1000-es anyagok kötéseinél, a szokásos ponthegesztési technológia alkalmazása esetén a hőhatásövezetében, illetve a heglencsében is keletkezhet repedés vagy üzem közben ridegtörés következhet be.

A DP acélok ponthegesztésének gyártói hegesztési utasításának (WPS-ének) kidolgozásakor abból kell kiindulni, hogy a DP lemez szövetszerkezete jelentős mennyiségű, alacsony karbontartalmú, ún. lágy martensitet tartalmaz, és az acél ötvözői és mikroötvözői az átalakulási diagramok befolyásolásával az austenitesedett anyagterületek (varrat és a hőhatásövezet egy része) edződését egyaránt elősegítik. A kedvezőtlen szövetszerkezetet a hűlési sebesség lassításával kerülhetjük el. Ellenállás-ponthegesztéskor ez praktikusán a szakaszos energiabevitel alkalmazását [11], vagy a hegesztő fődő után beiktatott *in machine* hőkezelő ciklus használatát jelenti [12].

A DP acélok ponthegesztéséhez a lágyacélokhöz (Mild) viszonyítottan a nagyobb fajlagos ellenállásukból, nagyobb melegsíllárdságukból és a rövid idejű hőhatás alatti megeresztésállóságukból következően mintegy 20...25%-kal nagyobb elektróderő, a nagyobb elektróderő okozta ellenálláscsökkenést kompenzáló 10-20 %-kal nagyobb áramerősség és ugyanolyan mértékkel hosszabb hegesztési fődő javasolható. További nyíró-szakítóerő, felszakítóerő vagy szakítóerő növekedés várható nagyobb elektródátmérő és más elektródacsúcs-geometria alkalmazásától [1, 8]. A DP acélok – a többi AHSS acélminőséghez hasonlóan – AC és MFDC hegesztőgépekkel egyaránt hegeszthetők.

6. Összefoglalás

A mai kor fokozott követelményeit kielégítő személygépkocsik gyártása során egyre szélesebb körben alkalmazott ferrit-martensites szövetszerkezetű DP acélok elméleti és kísérleti vizsgálatával az ebbe a típusba tartozó acélok ellenállás-ponthegesztetőségére vonatkozóan a következőket állapítottuk meg.

1. Az autógyárakban és beszállítóknál a korszerű nagyszíllárdságú acélok közül leggyakrabban a különböző vegyi összetételű, pontosan nem ismert gyártási technológiájú, és mindezek következtében eltérő hegeszthetőségi tulajdonságú, jellemzően 600 és 1000 MPa közé eső szakítószíllárdságú és a szíllárdságnak megfelelő ferrit-martensit szövetszerkezetű (DP) acéltípusokkal találkozhatunk.

2. A DP acélok szíllárdságának növelésével az edződési hajlam növekszik, a törésig elviselt képlékeny alakváltozás mértéke (törési alakváltozási tartalék) csökken. A kedvezőtlen változásokat ugyanakkor a DP acélok kedvező (kiindulási) $R_{p0,2} / R_m$ hányadosa és az acélra jellemző átlagos C koncentrációnál alacsonyabb karbontartalmú ferrit-mátrix kiváló alakíthatósága ellensúlyozza.

3. A DP acélok ponthegesztésekor az edződési keménységnövekedés és az ennek eredményeként megnövekvő repedésveszély csökkentésére/elkerülésre jól szabályozha-

tó hőbevitelre van szükség, amely gyakorlatilag szakaszos energiabevittel és/vagy *in machine* utóhőkezeléssel (aszimmetrikus kétciklus) alkalmazásával oldható meg. Az acélok nagyobb melegsíllárdságának ellensúlyozására a sajtolóerő, a hegesztőáram és a hegesztési idő enyhe növelése ajánlott.

7. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka 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.

8. IRODALOM

- [1] World Steel Association: Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, Version 4.1., June, 2009, p.: 1-16, www.wordautosteel.org
- [2] Tisza M.: Járműipari anyagfejlesztések, GÉP, LXIII. (2012), 4. szám, pp.: 3-10
- [3] Wagoner, R. H.: Advanced High Strength Steel Workshop, October 22-23, 2006, Arlington, Virginia, USA
- [4] Balogh A, Gáspár M., Prém L.: A hegesztett szerkezetek konvencionális és korszerű nagyszíllárdságú acéljainak rendszerezése és hegesztési nehézségei, Gép LXIV. (2013). No. x. p.: y-z
- [5] Balogh A, Gáspár M.: Nagyszíllárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója, Hegesztéstechnika, XXIII. (2012), 3. szám, p.: 23-28
- [6] Tsipouridis, P.: Mechanical properties of Dual Phase steels, PhD dissertation, Technische Universität, München, 2006
- [7] Dziedzic, M., Turczyn, S.: Experimental and numerical investigation of strip rolling from dual phase steel, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. X., No. 4., pp.: 21-30, 2010
- [8] DOCOL Advanced High Strength Steels for Automotive Industry, www.ssab.com
- [9] Balogh A.: Ellenálláshegesztés (Hegesztés és rokon technológiák Kézikönyv 3.5. fejezete), GTE, Budapest, 2007. p.: 261-298
- [10] Oikawa H., Sakiyama T., Ishikawa T., Murayama G., Takahashi Y.: Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobiles, Nippon Steel Technical Report, No. 95, 2007
- [11] Prém L., Balogh A.: Autóipari lágyacél vékonylemezek ellenállás-ponthegesztése különböző energia-beviteli módokkal, Gép LXIV. (2013). No. 2. p.: 7-10
- [12] Balogh A, Prém L.: Az acélminőség, a hidegalakítási mérték és a ponthegesztési technológia egymásra hatása, Hegesztéstechnika, XXIV. (2013), 1. szám, pp.: 41-46



Nemzetközi Hegesztő Szakmérnök

szakképzettséget adó képzés indul

a MISKOLCI EGYETEMEN

NEMZETKÖZI HEGESZTŐ SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉSI SZAK

keretében

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kara kellő számú jelentkezés esetén rendszeresen indítja a Nemzetközi Hegesztő Szakirányú Továbbképzési Szakát. A képzés 3 féléves, diplomaterv készítéssel és záróvizsgával végződik, amelyen a jelöltek – sikeres vizsga esetén – **nemzetközi hegesztő szakmérnök** oklevelet szerezhetnek.

A hegesztő szakmérnöki képzés tanterve és tananyaga az EWF (Európai Hegesztési Szövetség) által előírt követelményeket maradéktalanul kielégíti, ezért a résztvevők a

Nemzetközi Hegesztőmérnöki Diplomát (EWE/IWE) is megszerezhetik.

A hegesztő szakmérnök képzés célja, hogy a hegesztés és rokoneljárásai területén megfelelő mélységű szakmai, tudományos és gyakorlati ismereteket adjon a következő témakörökben:

- anyagtudomány (anyagismeret és hegeszthetőség, anyagvizsgálat)
- hegesztőeljárások és berendezések,
- hegesztett szerkezetek tervezése,
- hegesztett szerkezetek gyártása és minőségbiztosítása.

A képzés önköltséges, a tandíj félévente 400 e Ft/fő (létszámfüggő), ami magába foglalja a képzési, a gyakorlati munka, a diplomatervezés konzultálási és tananyag átadás díját. A záróvizsga és **nemzetközi hegesztőmérnöki** együttes vizsga díja 160 e Ft/fő. A képzésben résztvevők félévenként négy alkalommal 5-5 napot töltenek az egyetemen, az első időszak várhatóan 2014. szeptember második fele.

A képzésre a bemeneti feltétel: gépészmérnöki (főiskolai, BSc, MSc szintű) diploma és két éves gyakorlat. További információkkal az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet készséggel áll rendelkezésre.

A képzésre jelentkezni lehet: **Miskolci Egyetem, Felnőttképzési Regionális Központ**

3515 Miskolc-Egyetemváros <http://www.felnottkepzes.uni-miskolc.hu>

DP 600 AUTÓIPARI ACÉL AWI HEGESZTÉSÉNEK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

FINAL ELEMENT MODELLING OF TIG WELDING OF DP 600 AUTOMOTIVE STEEL

Gáspár Marcell*, Prém László**,

Vékony Sándor***, Dr. Balogh András****

ABSTRACT

Dual-phase steels, belonging to the group of advanced high strength steels, are widely used in automotive industry. Within fusion welding technologies TIG welding is one of the most suitable for sheets. The weldability of these steels is different from mild steels, therefore the effect of welding parameters for properties of weld metal and HAZ is suggested to be investigated by final element modelling. This paper presents a TIG welding technology for a DP 600 steel, verified by final element modelling.

1. Bevezetés

Az autóiparban a sajáttömeg csökkentése, az alacsonyabb üzemanyag-fogyasztás és a kisebb mértékű károsanyag kibocsátás érdekében előtérbe került a korszerű nagyszilárdságú acélok felhasználása, amelyek közül napjaink személygépjárműiben széles körben alkalmazzák a ferrit-martensites szövetű Dual Phase (DP) acélokat. Ezen acélok hegesztéstechnológiájának kidolgozásakor a lágyacélokhöz képest szigorúbb követelményeket kell betartani, mivel ezen acélok nagy szilárdsági és alakváltozási jellemzőiket a ferrit-martensit szövetarány megfelelő beállításával nyerik el. A hegesztéstechnológia tervezéséhez, a hegesztési paraméterek hatásának vizsgálatához a végeleemes szoftverek kiváló lehetőséget teremtenek. Ezeket a programrendszereket az autóipar fejlesztőmérnökei is rendszeresen használják. Napjainkban már olyan szoftverrendszerek is rendelkezésre állnak, amelyek segítségével fizikai tesztek elvégzése nélkül a személygépkocsik nagyszilárdságú acélból készülő karosszérialemezeinek alakítása, hegesztése, illetve akár töréstanulmány is egy virtuális környezetben elvégezhető [6]. Ebben a cikkben a ferrit-martensites szövetű korszerű nagyszilárdságú acél vékonylemezek DP 600 típusának semleges védőgáz, volfrámelektrodos hegesztésével foglalkozunk. A technológia tervezése során a hegesztési folyamatok végeleemes modellezésére specializált SYSWELD és

VISUAL ENVIRONMENT programrendszerek segítségével elemezzük a szövetszerkezetben bekövetkező változásokat, illetve a hegesztési paraméterek hatását. A cikk végén a végeleemes modellezés számítása során kapott eredményeket valós hegesztési kísérletek anyagvizsgálati eredményeivel hasonlítjuk össze.

2. A kísérleti alapanyag

A hegesztési kísérletek és a végeleemes modellezés alapanyagaként a nagy múltú svéd acélgyártó, az SSAB által előállított Docol DP 600 jelű korszerű nagyszilárdságú acél vékonylemezt választottuk. Ez az anyagminőség a legújabb autóipari anyagfejlesztéseknek köszönhetően egyre szélesebb körben terjedt el és jelent meg az elmúlt néhány évben nemcsak a nemzetközi, hanem a hazai járműipari beszállítók által feldolgozott acéltípusok között.

A hidegen hengerelt DP 600-as acél vékonylemez járatos lemezvastagság tartománya 0,5-2,1 mm. A hegesztési kísérletekhez 1 mm-es lemezvastagságban, 1250 mm x 2000 mm-es táblaméretben, olajozott kivitelben szállított vékonylemezeket használtunk. A lemeztáblát (keménysége miatt) számjegyzéklésű lézervágó berendezés segítségével daraboltuk a próbahegesztésekhez és a vizsgálatokhoz szükséges kívánt méretre.

A kis karbontartalmú, mikroötvözött DP 600-as acél ömlesztő hegesztéséhez leggyakrabban alkalmazott hegesztő eljárások a védőgázos fogyóelektrodás ívhegesztés, a semleges védőgázos, volfrám elektrodos ívhegesztés, a plazmaív hegesztés és a lézersugár hegesztés. A hegesztendő alapanyag vastagsági méretét és a fent említett eljárások elterjedtségét alapul véve a kísérletek és így a modellezés során alkalmazandó hegesztő eljárásának a semleges védőgázos, volfrám elektrodos ívhegesztést (SWI) választottuk. Az SWI eljárás alkalmazásának további nagy előnye, hogy ennél az eljárásnál az ív hőforrás és a hozaganyag elkülönül egymástól, így a hőbevitel rendkívül jól szabályozhatóvá válik, amely egy 1 mm vastagságú vékonylemez tompakötésének hegesztésekor alapvető fontossággal bír.

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem,

** PhD hallgató, Miskolci Egyetem,

*** MSc hallgató, Miskolci Egyetem

**** egyetemi docens, Miskolci Egyetem,

3. A DP 600-as acél hegeszthetősége

A DP 600-as elnevezésben a DP (Dual Phase) jelölés az acél „kettős fázisú” szövetszerkezetére, míg a 600-as szám az előírt, minimálisan garantált, MPa mértekegységű szakítószilárdság értékére utal.

A ferrit-martensites szövetszerkezetet a legtöbb esetben egy folyamatos hőkezeléssel (áthúzó kemencében) állítják elő, melynek lényege, hogy az $\alpha+\gamma$ mezőben kialakítják a kívánt ferrit/austenit fázisarányt, majd szabályozott hűtéssel, a bainites mezőt elkerülve, az acélt edzik. A lágy és szívós ferrit a jó alakíthatóságot biztosítja, míg a ferritet körülölelő, diszperz eloszlású martensit szigetek az acél szilárdságát növelik [3]. A DP 600-as acél ferrit-martensit arányának meghatározásához mikrosziszolati próbatesteket készítettünk, majd az elkészült csiszolatokat képelemző szoftverrel értékeltük. Az elkészült csiszolatokon mikrokeménység méréssel meghatároztuk a ferrit és a martensit, valamint az alapanyag átlagkeménységét is.



1. ábra. A DP 600-as acél ferrit-martensites mikrosziszolati képe. Nagyítás: 500x, Marószér: Nital

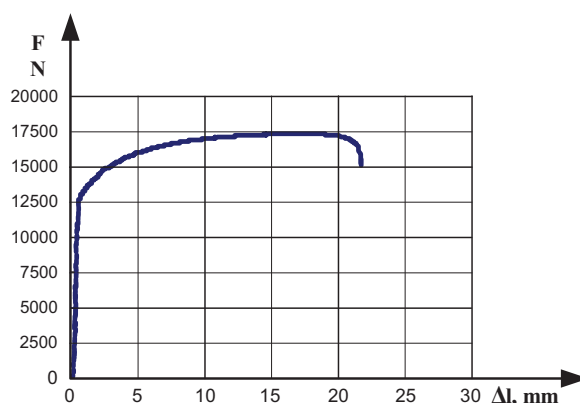
Az 1. ábrán jól megfigyelhető a heterogén szövet-szerkezet: a jóval lágyabb ferrit mátrixba ágyazott kemény martensit szigetek (ferrit-világos, martensit-sötét). A képelemzés és a keménységmérések eredményeit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

Megnevezés	DP 600
Ferrit-arány (%)	65%
Martensit-arány (%)	35%
Ferrit-keménység (HV0,01)	178
Martensit-keménység (HV0,01)	335
Átlag-keménység (HV0,2)	235

1. táblázat: A DP 600-as acél mikroszerkezetének jellemzői

A DP 600-as alapanyag mechanikai jellemzőit szakítóvizsgálattal határoztuk meg, melynek eredményei a 2. táblázatban szerepelnek. A vizsgálatok során felvett szakítódigramok egyikét a 2. ábra mutatja. A szakítóvizsgálatok eredményei jól tükrözik, hogy a DP acélok viszonylag nagy szakítószilárdságuk mellett igen jelentős szakadási nyúlással és nagy keményedési kitevővel

(n) rendelkeznek. Az is jól megfigyelhető, hogy a szakítódigram folytonos, nincs benne határozott folyáshatár.



2. ábra. DP 600 jelű acél szakítódigramja

Az $R_{p0,2}/R_m$ arány igen kedvezőnek mondható, 0,67-as értéket mutat, amely azt jelenti, hogy a DP 600-as acél képlékenysége jó közelítéssel megegyezik a körülbelül fele akkora szilárdságú hagyományos, szintén hidegen hengerelt lágyacél vékonylemezek alakváltozási tartálékával (pl.: DC01).

Anyagminőség	Mechanikai jellemzők			
	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{80} (%)	Z (%)
DP 600	669	448	18,7	60

2. táblázat: A DP 600-as acél mechanikai jellemzői

A Dual Phase acélok vegyi összetételét elemezve arra a megállapításra juthatunk, hogy a gyártók a hegeszthetőségi szempontokat szem előtt tartva a DP acélokat általában 0,15%-nál kisebb C-tartalommal, illetve 1,5%-ot nem meghaladó Mn-koncentrációval állítják elő. A Mn ötvözés mellett azonban a szilárdság és az edzhetőség javítására számos más ötvözőt is alkalmaznak, mint például a Cr, Mo, Ti vagy Nb, V és a B-t. Ezen ötvözők közül a króm, molibdén, vanádium és a bór növelik az edzhetőséget, valamint a ridegedési hajlamot. A Docol DP 600-as acél vegyi összetételét spektrométeres vizsgálatokkal határoztuk meg, a kapott eredmények a 3. táblázatban láthatóak.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	V	B
0,098	0,20	0,81	0,03	0,04	0,014	0,01	0,0002

3. táblázat: A kísérletekhez használt DP 600-as acél vegyi összetétele tömegszázalékban

Az általunk vizsgált acéllemez vegyi összetételéből látható, hogy a kedvező szilárdsági jellemzőket hidegalakítással és szemcsefinomító ötvözők hozzáadásával érték el. Kiemelést érdemel, hogy a gyártástechnológia

szempontjából rendszerint kétfajta DP acél érhető el a piacon. Az egyik a melegen hengerelt, erősebben ötvözött változat, a másik a kisebb ötvöző tartalommal rendelkező hidegen hengerelt típus. A hegesztési technológia tervezése során semmi esetre sem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy a hegesztendő alapanyag szövetszerkezetében "vakedzett" (alacsony karbon-tartalmú, ún. lágy) martensit van jelen, továbbá az edződést elősegítő ötvözők hatásával is számolnunk kell. Ebből kifolyólag a DP 600-as anyagminőség ívhegesztése során korlátozott vonalenergiára van szükség. Ezen acélok hegesztésekor kis vonalenergiánál az ötvözőelemek hatására a hőhatásövezet felkeményedhet, a kötés elridegedik, túlzottan nagy vonalenergia alkalmazása esetén pedig a hőhatásövezet kilágyul, keménysége az alapanyag keménységével közel egyező lesz, a kötés teherbíró-képessége pedig lecsökken [1, 2].

A Dual Phase acélok kedvező tulajdonságú, különleges heterogén (esetünkben ferrit-martensites) szövetszerkezete az alakítási folyamat és a lehűtés célirányos kombinációjának eredménye (termomechanikus kezelés), ezért ezeknél az acéloknál az eredeti, kiinduló anyagállapotot sajnálatos módon még hegesztést követő hőkezeléssel sem lehet visszaállítani.

4. Ívhegesztési folyamatok végeselemes modellezése

A termikus eljárások során, mint például hegesztéskor, az anyagban rendkívül összetett, komplex változások mennek végbe. Hegesztő eljárástól függően a hegfördőben különböző kémiai és fizikai folyamatok alakulnak ki. A munkadarabban a rajta végrehajtott hőciklus következményeként pedig hőtágulátsugorodás és fázisátalakulás(ok) játszódnak le. A legtöbb hegesztési feladat során a hőfolyamat következtében kialakuló alakváltozás gátolt, ez a darabban maradó feszültségeket és deformációkat okoz, amelyhez a fázisátalakulás(ok)ból származó strukturális feszültség is hozzáadódik, az alkatrészek élettartamát, üzemeltethetőségét rontva [7].

A termikus, mikroszerkezeti és mechanikai folyamatokat együttesen csatolt folyamatoknak nevezi a szakirodalom, mivel ezek egy időben lejátszódó folyamatok [5]. A hegesztési folyamat összetettségéből adódóan a végeselemes szoftverek közül viszonylag kevés az olyan program, amely a korábban említett valamennyi jelenség egyidejű modellezésére képes. A hegesztés következtében kialakuló speciális folyamatok vizsgálatára ezért elsősorban egy adott gyártási folyamat modellezésére specializált célszoftver, mint például a SYSWELD és VISUAL ENVIRONMENT bizonyul a legalkalmasabbnak, amely akár a hőhatásövezetben és varratban kialakuló szövetszerkezet előrejelzésére is képes. Ezek a programok azonban nem alkalmasak a varratban kialakuló áramlási folyamatok modellezésére, amelyre a későbbiekben bemutatott modellezési feladat szempont-

jából nincs is feltétlenül szükség. A VISUAL ENVIRONMENT lényegében a SYSWELD új, grafikus felületének tekinthető, a számítások továbbra is a SYSWELD-en keresztül történnek.

Az általunk vizsgált DP 600 acél szempontjából a hegesztéstechnológia tervezésére az említett programrendszer kiválóan alkalmas, mivel a numerikus számítások elvégzésével a hegesztéstechnológiai paraméterek szövetszerkezetre gyakorolt hatása elemezhető, valamint információt kaphatunk a maradó feszültségek eloszlásáról is.

5. Modellezési feladat összeállítása

A modellezési feladat során egy virtuális környezetben 1 mm vastagságú 150x80 mm méretű próbalemezeket hegesztünk össze autogén módon (hozaganyag nélkül), az SWI csoportba tartozó argon védőgázos volfrámelektrodos ívhegesztéssel (AWI, ISO kód: 141). Első lépésként elkészítettük a geometriai modellt és a végeselemes hálót. Hálózáskor arra törekedtünk, hogy a létrejövő varrat és hőhatásövezet környezetében minél finomabb hálósűrűséget alkalmazzunk. Ezt követően tértünk rá a hegesztési folyamattal kapcsolatos modellezési feladatok elvégzésére. Első lépésként az anyagminőséget kellett kiválasztanunk. Mivel nem alkalmaztunk hozaganyagot, ezért a későbbi varrathoz és alapanyaghoz ugyanazt az anyagminőséget rendeltük hozzá. A modellezés szempontjából az egyik legkritikusabb rész az anyagjellemzők, illetve anyagtörvények megfelelő ismerete. A hegesztési folyamat modellezése szempontjából viszonylag sok anyagjellemzőre van szükség, amelyek jelentős része függ a hőmérséklettől. Amennyiben a hegesztés során megváltozott szövetszerkezetéről is szeretnénk információt kapni, akkor a vizsgált acélunk folyamatos hűtésű átalakulási diagramjára is szükség van. A 4. táblázatban azok az anyagjellemzők szerepelnek, amelyek a numerikus számítások elvégzéséhez nélkülözhetetlenek.

Mechanikai anyagjellemzők	Hőfizikai anyagjellemzők
folyáshatár $R_{p0.2}(T)$	hővezetési tényező, $\lambda(T)$
alakítási szilárdság, $k_f(\varphi)$	fajhő, $c_p(T)$
Young modulusz, $E(T)$	entalpia, $h(T)$
Poisson tényező, ν	sűrűség, $\rho(T)$
Termikus nyúlás, $L(x,y,z,T)$	fázisátalakulások reakciói

4. táblázat: A modellezéshez szükséges anyagjellemzők

A fentiekből következik, hogy természetszerűleg a felhasználó részéről nem lehet elvárás, hogy egy ilyen szoftver minden hegeszthető acél anyagjellemzőit ismerje, ezért a program lehetőséget biztosít más anyagadatbázisokban szereplő, vagy mérési úton meghatározott anyagjellemzők bevitelére. Ez utóbbi azonban meglehetősen időigényes és költséges

feladatnak bizonyul. Szerencsére a szoftver viszonylag korlátozott anyagadatbázisa ellenére tartalmazott DP 600 acélt, amely szintén ennek az acéltípusnak az autópárhánban történő elterjedtségére utal. A szoftverben szereplő DP W 600 acél bár mechanikai tulajdonságait tekintve azonos kategóriába esik a hegesztési kísérleteinkhez használt korszerű nagyszilárdságú acél tulajdonságaival, gyártástechnológiáját tekintve eltér attól. Míg a kísérletek során alkalmazott Docol DP 600 hideghengerléssel készül, addig a program adatbázisában lévő DP-acélt melegehengerléssel gyártják, amelyre a jelölésben a W betű utal. A gyártástechnológiai különbségét igazolja a két acél eltérő vegyi összetétele (3. és 5. táblázat), ugyanis a hidegalakítással gyártott DP acélból lényegében hiányzik az átédződést segítő króm. Ilyen esetben a korszerű anyagvizsgálati módszerek, pl. a fizikai szimuláció nyújthat segítséget, amellyel sikeresen meghatározhatók a modellezéshez használt anyagjellemzők [8].

C	Si	Mn	Cr	Al
0,085	0,11	1,54	0,41	0,16

5. táblázat. Szoftver anyagadatbázisában szereplő DP W 600 acél vegyi összetétele tömegszázalékban

A modellezés következő lépésében kiválasztottuk és beállítottuk az adott hegesztő eljárásra (AWI) jellemző hőforrás modellt (Goldak-féle hőforrás) [6, 7]. Ezután a hegesztési paraméterek megadására került sor, amelyeket a 6. táblázat foglal össze. A számítás két különböző vonalenergiával futtattuk le, amelyet a végelelemes modellezést követő hegesztési kísérlet során egyedül az áramerősség változtatásával értünk el.

	U_{iv} (V)	I_h (A)	v_h (cm/min)	E_v (J/mm)
1.	11,5	38	8-9	186
2.	11,3	31,6	8-9	151

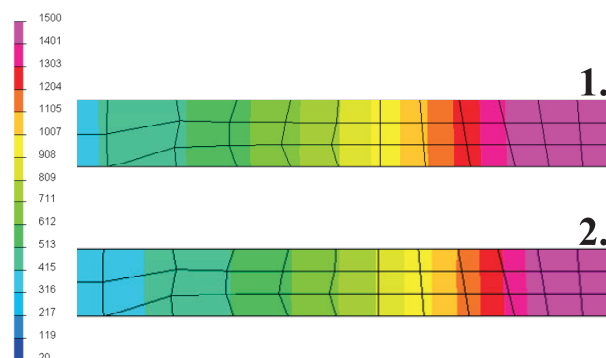
6. táblázat. Hegesztési paraméterek

A modellezés, illetve a valós hegesztési kísérlet során alkalmazott hegesztési paramétereket a 6. táblázat tartalmazza, amelyben az ívfeszültség értékeit az argonvédőgázos volfrámelektrodos ívhegesztéshez tartozó (ISO által ajánlott) munkaegyes segítségével határoztunk meg [9].

A hegesztési paraméterek és a hegesztés pálya definiálása után a termikus és mechanikai peremfeltételek megadása következett, amelynél a megfogásokkal együtt figyelembe vettük a modellezést követő tényleges hegesztési kísérlet összeállítási tervét.

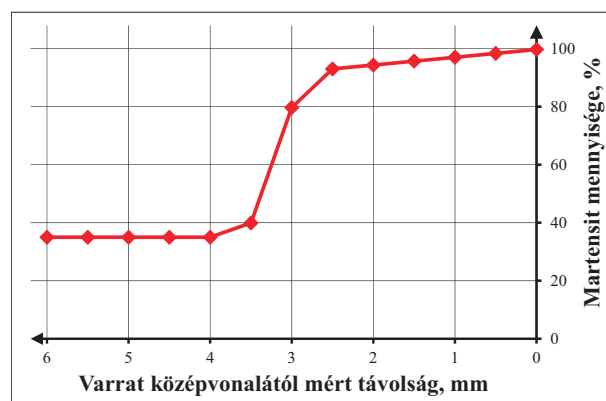
A modellezés során kapott eredmények közül először a két különböző vonalenergiához tartozó hőmérsékletmezőt hasonlítottuk össze (3. ábra). Az ábra a hegesz-

tett kötés egy adott keresztmetszetében a hőforrás elhaladásakor kialakuló hőmérsékletmező keresztirányú hőmérséklet eloszlását szemlélteti. Látható, hogy az adott hőmérsékletre tartozó izotermák nagyobb vonalenergia esetén a varrat közép vonalához képest távolabb helyezkednek el. A végelelemes analízis során számított hőmérsékletmezőt a következő fejezetben valós hegesztési kísérlettel is igazoltuk.



3. ábra. A hegesztési paraméterek hőmérsékletmezőre gyakorolt hatása

Következő lépésként a hegesztési folyamat során megváltozó szövetszerkezetet vizsgáltuk meg, amelyet a program a folyamatos hűtési átalakulási diagramok felhasználásával prognosztizál. Fontos kihangsúlyozni, hogy a szoftver a hegesztéstechnológiára jellemző gyors hűlési sebességek miatt a számításoknál csak a martensites átalakulást veszi figyelembe, annak ellenére, hogy ezek az acélok elvileg bainitot is tartalmazhatnak.



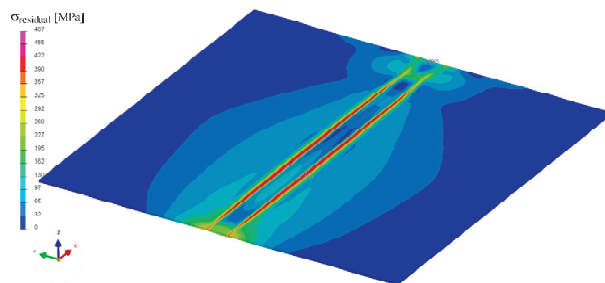
4. ábra. A martensit mennyiségének részaránya keresztirányban (2. kísérlet)

Az austenites átalakulás kezdetét és végét jelző hőmérsékletek a szoftver adatbázisa alapján a következők: $A_{c1} = 727^\circ\text{C}$, $A_{c3} = 867^\circ\text{C}$. Az anyagjellemzőket tartalmazó fájl sajnos nem nyújt információkat a kiinduló szövetek arányára, ezért az általunk vizsgált DP 600 acél esetében a képelemzési úton meghatározott 35% martensit arányt vettük alapul. Ahogyan a 4. ábrán lát-

ható, az alapanyagtól a varrat felé haladva a martensit aránya folyamatosan nő, és lényegében a varrat és a hőhatásövezet beolvadási vonalhoz közeledő része szinte teljesen martensites szövetszerkezetű lesz.

A két eltérő vonalenergiával készült modell összehasonlításakor azt tapasztaltuk, hogy a kisebb fajlagos hőbevitel alkalmazásával készült kötés hőhatásövezete szélesebb tartományban tartalmaz martensitet, amely fokozott ridegedési hajlamot jelez. A jelentős martensit tartalom az alacsony vonalenergia mellett a króm jelenlétének köszönhető, amely a folyamatos hűtésű átalakulási diagramban szereplő görbéket jobbra tolva kedvezően hat a martensit képződésére.

A hegesztési folyamatok végeleemes modellezésének óriási előnye, hogy olyan információkat kaphatunk a hegesztett kötésről, amelyet más módon nem, vagy csak körülményesen tudnánk megszerezni. Ezek közé tartozik a maradó feszültség, amelynek mértékére és eloszlására csak viszonylag költséges anyagvizsgálatokkal (röntgen diffrakció, mérőbélyeges mérés) kaphatunk választ. A szoftver segítségével azonban a mechanikai peremfeltételek precíz megadásával előzetes becslést tudunk adni a maradó feszültség eloszlásáról, így olyan hegesztéstechnológiát tudunk kidolgozni, amely alacsonyabb szintű maradó feszültséget, ezért hosszabb távú és biztonságosabb üzemeltethetőséget biztosít a hegesztett szerkezet számára. A számítások alapján a hegesztett kötésben (5. ábra) a maradó feszültség maximális értéke megközelítette, illetve bizonyos esetben a folyáshatárt is meghaladta (2. táblázat).

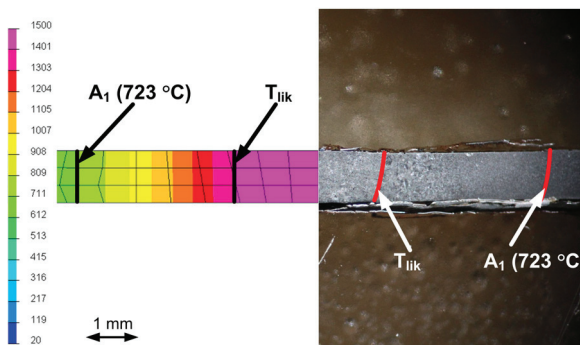


5. ábra. A maradó feszültség eloszlása a hegesztést követően (Von Mises elmélet alapján)

6. Modellezés eredményeinek összehasonlítása a hegesztési kísérlettel

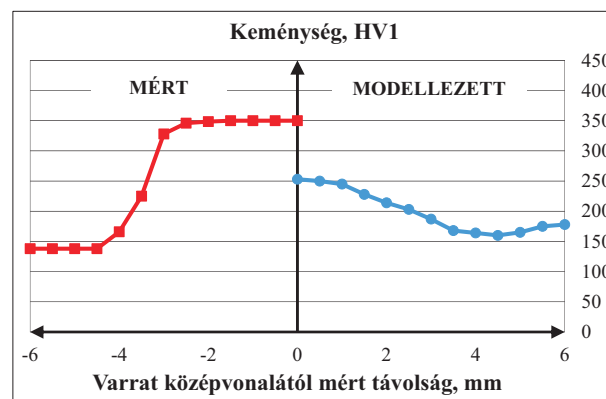
A végeleemes modellezés során kapott eredményeket összevetettük a valós hegesztési kísérletet követő anyagvizsgálatok eredményeivel. A modellezés igazolása szempontjából a legalapvetőbb a virtuális és valós hőmérsékletmező összevetése. Amennyiben nem áll rendelkezésünkre termoeleemes műszer, elegendő egy keresztirányú makrociszolatot készítenünk, amelyen a likvidusz hőmérséklethez (T_{lik}) tartozó beolvadási vonal és a látható hőhatásövezet széle (A_1) jól azonosítható. Amennyiben a modellezés során ez a két görbe a kötés

keresztirányú metszetének jó közelítéssel ugyanazon pontjaiban helyezkedik el, akkor a hőforrás beállítása szempontjából a modellezés sikeresnek mondható. A hőmérsékletmező alapján a szoftver meg tudja jeleníteni a hőhatásövezetben szereplő csomópontok hőciklusait is, amelyek bemeneti paraméterként szolgálhatnak a fizikai szimulátor hőhatásövezeti tesztjeihez [7, 8]. A 6. ábrán jól látható, hogy a hőforrásra vonatkozó célkitűzést sikerült teljesítenünk, a modellezés során kapott hőmérsékletmező kritikus izotermái megegyeznek a valós hegesztett kötés beolvadási vonalához, illetve a látható hőhatásövezet széléhez tartozó görbékkel.



6. ábra. A modellezés és a valós hegesztési folyamat során kialakuló hőmérsékletmező összehasonlítása (2. kísérlet)

Az anyagtechnológiákkal (alakítás, hőkezelés, hegesztés) kapcsolatos modellezési feladatoknál az eredmények igazolására gyakran a virtuális és valós keménységeloszlást szokták összevetni. A 7. ábra bal oldala az első kísérlet során mért keménységeket, a jobb oldali rész pedig a modellezés eredményeit szemlélteti.



7. ábra. A modellezés során számított eredmények összehasonlítása a valós hegesztett kötés keménységeloszlásával (1. kísérlet)

Látható, hogy a modellezés során kapott csúcskeménység (350 HV) jelentősen meghaladja a valós hegesztett kötésben mért csúcskeménységet (250 HV).

Ennek elsődleges oka, hogy bár mindkét esetben közel azonos mechanikai tulajdonságokkal rendelkező DP 600 acélt alkalmaztunk, a végelelemes modell esetében a szoftver anyagadatbázisában szereplő DP W 600 acél meleghengerléssel készül, ebből kifolyólag pedig nagyobb krómtartalommal kell rendelkeznie ahhoz, hogy a hideghengerelt acélra jellemző mechanikai tulajdonságokat elérje. Ebből adódóan a 350 HV csúcskeménység legfőbb indoka a króm, amely a varrat és a hőhatásövezet beolvadási vonalához közel eső részének martensites szövetszerkezetét igazolja. Érdeemes megemlíteni, hogy előzetes ívponthegeztési kísérleteket végeztünk a hideghengerelt DP 600 alapanyagon, ahol a heglencsében 340 HV csúcskeménységet mértünk.

7. Összefoglalás

A cikkben áttekintettük a Dual Phase (DP) acélok tulajdonságainak és hegeszthetőségének legfontosabb jellemzőit. A hegesztés hőciklusa a lehűtés és hengerlési alakítás speciális kombinációjaként létrehozott ferrit-martensites szövetszerkezetet irreverzibilisen megváltoztatja, ezért a hegesztéstechnológia tervezésekor a lágyacél lemezekhez képest körültekintőbben kell eljárni.

A végelelemes modellezés nagy lehetőséget jelent ezen speciális acélok hegesztéstechnológiájának tervezésére, illetve a hegesztési folyamatok mélyebb megértésére. A cikkben a Mechanikai Technológiai Tanszéken elérhető hegesztési folyamatokra specializált végelelemes szoftverrendszer segítségével egy DP 600 korszerű nagyszilárdságú autóiipari acél argon védőgázos volfrámelektrodás ívhegesztését sikerült egy virtuális térben megvalósítani. A modellezés során információkat kaptunk a hegesztési paraméterek hatásáról, a folyamat során kialakuló szövetszerkezetről és a maradó feszültségekről is. A kapott eredményeket valós hegesztési kísérletekkel igazoltuk, azonban a modellezési feladat pontosításához a hideghengerléssel készült DP 600 acél anyagjellemzőinek pontos meghatározására van szükség.

IRODALOM

- [1] Balogh, A., Török I., Gáspár M., Juhász D.: Present State and Future of Advanced High Strength Steels, Production Processes and Systems 5, pp. 79-90., 2012
- [2] Nilson, T.: Welding Guide of AHSS/UHSS for the automotive industry – A guide for the automotive industry, SSAB Knowledge Service Center, Borlänge, Sweden, 2012
- [3] Tisza, M.: Járműipari acélfejlesztések, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., pp. 3-10., 2012
- [4] Balogh, A.; Komócsin, M.: Hegesztési technológiák számítógépes tervezése, „A felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése” CAD/CAM/FEM kompetencia kurzusok projekt, Miskolci Egyetem, 2005
- [5] Pogonyi, T.; Palotás, B.: „SYSWELD” a hegesztés végelelemes modellezésének eszköze, 26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás, Budapest, 2012, pp. 35-44
- [6] Tejc, J.: Welding Simulation Solution, Előadás, Sysweld és Visual Environment tanfolyam, ESI Group, Dunaújváros, 2012
- [7] Gáspár, M.: A hőmérsékletmező előállítása nagyszilárdságú acélok hegesztésének végelelemes modellezésekor, GÉP, LXIV. évf. 4. sz. pp. 37-42. 2013
- [8] Kuzsella, L.; Lukács, J.; Szűcs, K.: Fizikai szimulációval végzett vizsgálatok S960QL jelű, nagyszilárdságú acélon, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., pp. 37-42., 2012
- [9] Balogh A., Sárvári J., Schäffer J., Tisza M.: Mechanikai Technológiák, 4. kiadás, Miskolci Egyetemi Kiadó, pp. 143-270., 2008

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az ismertetett kutatómunka 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.

KÉT ALUMÍNIUMÖTVÖZET LINEÁRIS DÖRZSHEGESZTÉSSEL KÉSZÜLT KÖTÉSEINEK VISELKEDÉSE ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTEL ESETÉN

BEHAVIOUR OF FRICTION STIR WELDED JOINTS MADE OUT OF TWO ALUMINIUM ALLOYS UNDER CYCLIC LOADING CONDITIONS

Meilinger Ákos*, Dr. Lukács János**

ABSTRACT

The friction stir welding (FSW) is a dynamically developing version of the pressure welding processes. Nowadays, the knowing of the properties and the behaviour of the welded joints is an important direction of the investigations, especially under cyclic loading. The research work aimed (i) to demonstrate the behaviour of the friction stir welded joints under cyclic loading conditions; (ii) to determine fatigue limit or design curves for aluminium alloys and their welded joints made by FSW process. Experiments were performed on 5754-H22 and 6082-T6 aluminium alloys and their welded joints. Both high cycle fatigue (HCF) and fatigue crack propagation (FCG) tests were executed on both base materials and their welded joints. Statistical behaviour of the base materials and welded joints was represented by the cutting of the specimens and the using of different crack paths. HCF limit curves were determined based on staircase method. FCG limit curves can be determined by own developed six step method. The investigations and their results were compared with each other and with the results can be found in the literature.

1. Bevezetés

Az alumíniumötvözetek szerepe a szerkezeti alkalmazásokban napjainkra megkérdőjelezhetetlenné vált. A repülés, a járműipar [1], a hídszerkezetek [2] stb. területén egyre több céllal és egyre nagyobb mennyiségben használnak alumíniumötvözeteket. A különféle anyagfejlesztések (például [3]) egyik törekvése is az, hogy az alkalmazási tartomány minél szélesebb lehessen, kielégítve ezzel a legváltozatosabb felhasználói igényeket.

Az anyagfejlesztések mellett, azokkal szoros kapcsolatban, technológiafejlesztésekre is szükség van,

legalább a felhasználói követelmények – benne a biztonsági követelmények – teljesíthetősége és a gazdaságosság szempontjainak kielégítése okán. Nincs ez másképp a hegesztéstechnológiák területén sem, ahol a lineáris dörzshegesztés (FSW), megalkotása (1991) óta [4] az egyik legdinamikusabban fejlődő sajtoló hegesztő eljárás [5]. Az anyagfejlesztés technológiafejlesztést indukál (például [6]) és ennek fordítottjára is találhatunk példákat.

A különféle szerkezeti alkalmazások esetében a terhelés igen gyakran ismétlődő jellegű, a károsodások (tönkremenetek) között a kisciklusú fáradás (LCF), a nagyciklusú fáradás (HCF) és a fáradásos repedésterjedés (FCG) egyaránt előfordul. Tekintettel az ismétlődő igénybevétel esetén bekövetkezett károsodások és káresetek jelentős súlyára, indokolt ezeket az igénybevételeket a vizsgálatok középpontjába állítani.

Jelen közleményünk célja két alumíniumötvözet (5754-H22 és 6082-T6) és lineáris dörzshegesztéssel készített hegesztett kötéseik ismétlődő igénybevételekkel (HCF és FCG) szembeni ellenállásának bemutatása. Saját megfontolásainkat és eredményeinket irodalmi adatokkal is összehasonlítjuk, továbbá utalunk az ismétlődő igénybevételekkel szembeni tervezési határgörbék származtatásának lehetőségeire is.

2. Anyagminőségek, hegesztett kötések, vizsgálati körülmények

A vizsgálatokra két csoportba (5xxx és 6xxx) tartozó alumíniumötvözet alapanyagon és azok FSW hegesztett kötéseik kerültek sor. A vizsgált és az összehasonlításra használt anyagok vegyi összetételét, vastagságát és alapvető mechanikai tulajdonságait az 1. és a 2. táblázatok tartalmazzák.

* tanársegéd,

** egyetemi tanár

Alapanyag	Mg	Si	Zn	Cu	Mn	Fe	Cr	Ti	Referencia
5754-O	3,3	0,19	0,08	0,03	0,34	0,2	–	–	[7]
5754	2,854	0,095	–	0,028	0,316	0,239	0,011	–	[9]
AlMg3	2,95	0,179	0,044	0,022	0,277	0,301	0,043	0,04	jelen cikk
5754-H22	2,8	0,26	0,06	0,04	0,32	0,31	0,05	0,03	jelen cikk
6082-T6	0,6	0,91	0,01	0,01	0,45	0,18	<0,01	0,01	[12]
6082-T6	0,59	0,96	<0,01	<0,01	0,45	0,19	<0,01	0,01	[12]
6082-T6	0,6	1,1	0,03	0,02	0,46	0,19	0,08	0,03	jelen cikk

1. táblázat. A vizsgált és az összehasonlításra használt anyagok vegyi összetétele (tömeg%).

Alapanyag	Falvastagság	Folyáshatár	Szakítószilárdság	Nyúlás	Referencia
	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	
5754-O	3	170	253	12,3	[7]
5754-H22	3	–	235	15,0	[8]
5754	4	165	252	17,6	[9]
AlMg3	12	128	218	–	jelen cikk
5754-H22	6	190	239	14,5	jelen cikk
6082-T6	3	276	323	12,5	[10]
6082-T6	5	260	310	–	[11]
6082-T6	5,8	130-135	220	–	[12]
6082-T6	4	291	317	11,3	[12]
6082-T6	6	267	305	20,0	jelen cikk

2. táblázat. A vizsgált és az összehasonlításra használt anyagok vastagsága és mechanikai tulajdonságai.

Az FSW kötések marógépen, saját tervezésű szerszámmal készültek. Az összehasonlításra használt és a vizsgált anyagok FSW kötéseinek technológiai paramétereit a 3. és a 4. táblázatok foglalják össze. Amint azt a 3. és a 4. táblázatok adatai mutatják, az

általunk alkalmazott technológiai paraméterek részben eltérnek a más szerzők által közölt adatoktól. Ez a tény megerősíti azt a tapasztalatot, hogy az FSW eljárás során többféle paraméter kombinációjával is elérhető megfelelő minőségű hegesztett kötés.

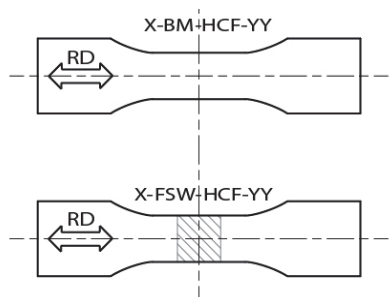
Alapanyag	Falvastagság	Hegesztési sebesség	Fordulatszám	Váll átmérő	Szerszám dőlésszög	Referencia
	mm	mm/min	rpm	mm	°	
5754-O	3	13	700; 1100	15	2	[7]
5754-H22	3	15; 20; 25	2000; 3000	18	–	[8]
5754-H22	6	100	400	16	2	jelen cikk
6082-T6	3	800	1500	15	2	[10]
6082-T6	5	115; 170; 260; 390; 555	330; 460; 630; 880; 1230; 1700	19	–	[11]
6082-T6	5,8	350	1000	–	–	[12]
6082-T6	4	700; 1400	2200; 2500	14	–	[12]
6082-T6	6	100	400	16	2	jelen cikk

3. táblázat. Az összehasonlításra használt és a vizsgált anyagok FSW hegesztésének technológiai paramétereit I.

Alapanyag	Falvastagság	Tű átmérő	Tű hossz	Tű geometria	Referencia
	mm	mm	mm	–	
5754-O	3	5/2	2	csónka kúp, menetes	[7]
5754-H22	3	6	2	menetes	[8]
5754-H22	6	8/4	5,7	lépcsős	jelen cikk
6082-T6	3	6	–	menetes	[10]
6082-T6	5	M6	4,8	menetes	[11]
6082-T6	5,8	–	–	–	[12]
6082-T6	4	6	–	–	[12]
6082-T6	6	8/4	5,7	lépcsős	jelen cikk

4. táblázat. Az összehasonlításra használt és a vizsgált anyagok FSW hegesztésének technológiai paramétereit II.

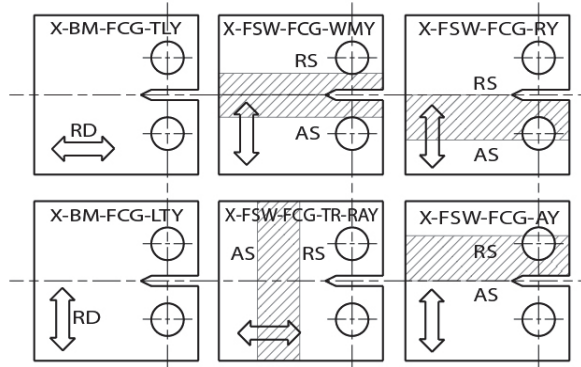
A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokhoz alkalmazott lapos próbatestek geometriáját az 1. ábra mutatja. (Jelölések: RD = hengerlési irány, X = alumínium anyagcsoport, BM = alapanyag, YY = a próbatest sorszáma.) Az alapanyagokhoz és az FSW kötésekhöz alkalmazott próbatestek geometriája azonos volt, az FSW kötéseken nem végeztünk sem utóhőkezelést, sem forgácsolást (as-welded condition). A vizsgálatokra húzó terheléssel, $R = 0,1$ terhelés aszimmetria tényezővel, szinusz alakú terhelési függvényvel, szobahőmérsékleten és laboratóriumi környezetben, MTS gyártmányú elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezésen került sor. A terhelési frekvencia $f = 30$ Hz volt.



1. ábra. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokhoz (HCF) alkalmazott próbatestek kialakítása.

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat CT próbatesteken végeztük ($W = 50$ mm), a bemetszés elhelyezkedését a hengerlési irányhoz és a hegesztett kötés hossztengetyéhez viszonyítva a 2. ábra szemlélteti. (Jelölések: TL = T-L orientáció, LT = L-T orientáció, WM = varratfém, TR = keresztirány, AS és A = előre oldal, RS és R = hátra oldal, RA = hátra oldal felől előre oldal felé.) Ahogy azt a 2. ábra mutatja, a bemetszések elhelyezése, illetve a repedések terjedése reprezentálta a legfontosabb és legjellemzőbb

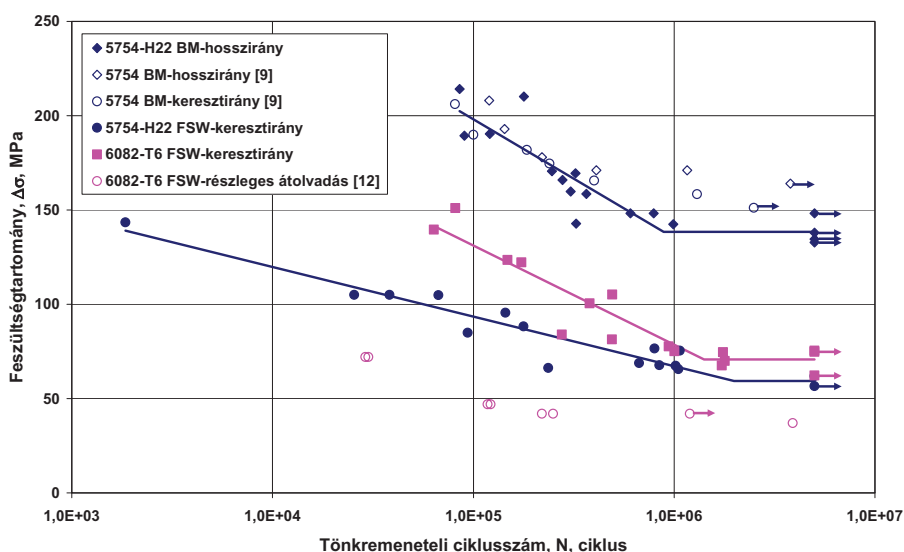
irányokat. Az FSW kötéseken ezeknél a vizsgálatoknál sem végeztünk sem utó-hőkezelést, sem forgácsolást. A vizsgálatokra ugyanazon körülmények között és berendezésen került sor, mint a nagyciklusú fárasztóvizsgálatok esetében. A terhelési frekvencia a repedésterjedés első két harmadában $f = 20$ Hz, utolsó harmadában pedig $f = 5$ Hz volt, a terjedő repedés méretét compliance módszerrel határoztuk meg.



2. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz (FCG) alkalmazott próbatestek kialakítása.

3. A vizsgálatok eredményei

A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok során a töréshez tartozó ciklusszámokat rögzítettük. Az 5754-H22 anyagminőség FSW kötéseiben a törés a varratközépből, míg a 6082-T6 anyagminőség kötéseiben a varratszélen következett be. Saját vizsgálatainkat a [13] közleményben bemutatott módszer szellemében értékeltük (Wöhler görbék meghatározása). A vizsgálati eredményeket és az összehasonlításra használt vizsgálatok eredményeit a 3. ábra foglalja össze.

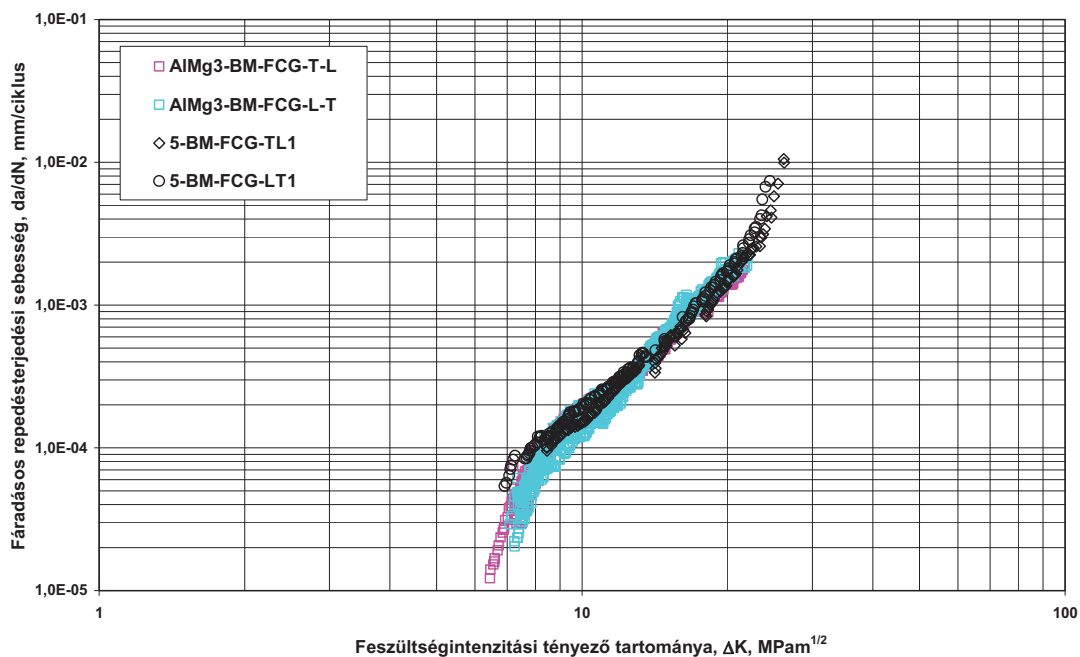


3. ábra. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei és a számított Wöhler görbék.

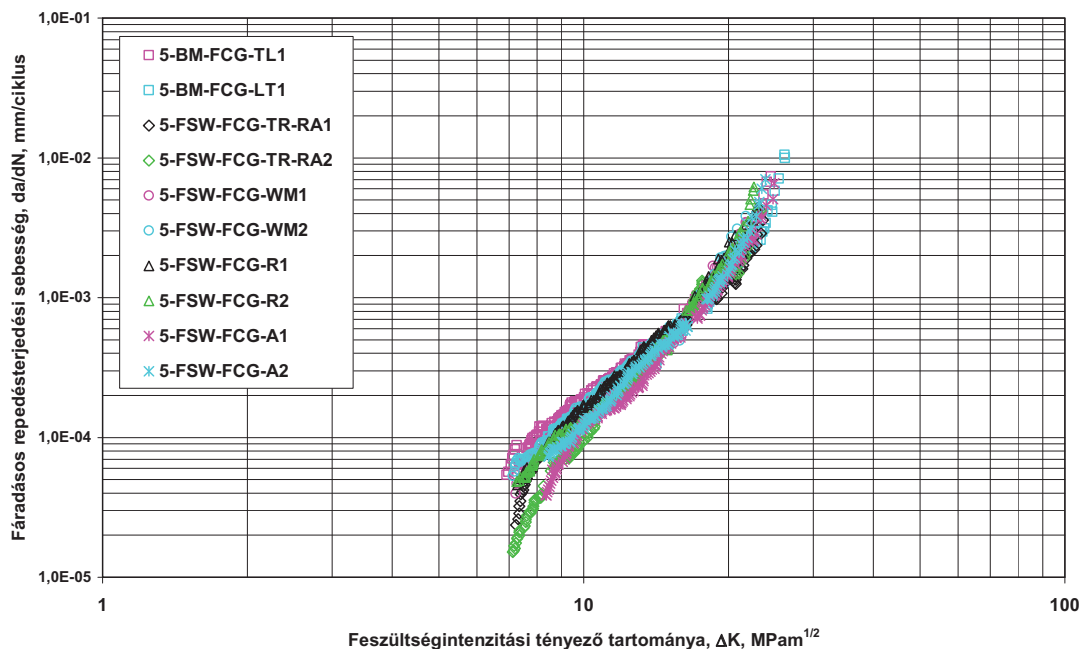
A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok értékeléséhez a hét ponton átmenő polinomos módszert [14] használtuk és meghatároztuk a Paris-Erdogan összefüggés állandóit (C és n) [15]. Az AlMg3 és az 5754-H22 alapanyagokon meghatározott kinetikai diagramokat, az orientációkat (T-L és L-T) is figyelembe véve, a 4. ábra szemlélteti. Az 5754-H22 anyag FSW kötéseinek meghatározott kinetikai diagramokat, a különböző

irányokban, illetve kötés részekben terjedő repedésekre, az 5. ábra mutatja be.

Az egyes kinetikai diagramokból meghatározott Paris-Erdogan állandókat az 5. táblázat foglalja össze. Azokban az esetekben, amikor a kinetikai diagram több egyenes szakasszal írható le az értelmezhető tartományokban, akkor az 5. táblázatban csak a diagram legnagyobb (középső) tartományát leíró összefüggés állandóit közöljük.



4. ábra. Az alapanyagokon (AlMg3, 5754-H22) elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok kinetikai diagramjai.



5. ábra. Az FSW kötésekből (5754-H22) kimunkált próbatesteken elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok kinetikai diagramjai.

A próbatest jele	C	n	r	A próbatest jele	C	n	r
AlMg3-BM-FCG-TL1	1,55E-07	3,06	0,994	5-BM-FCG-TL1	1,76E-07	3,04	0,996
AlMg3-BM-FCG-TL2	1,61E-07	3,03	0,993	5-BM-FCG-LT1	1,10E-07	3,15	0,996
AlMg3-BM-FCG-TL3	1,52E-07	3,05	0,993	5-FSW-FCG-TR-RA1	1,00E-07	3,16	0,997
AlMg3-BM-FCG-TL4	1,06E-07	3,20	0,993	5-FSW-FCG-TR-RA2	1,12E-07	3,97	0,995
AlMg3-BM-FCG-TL5	1,62E-07	3,03	0,993	5-FSW-FCG-WM1	1,49E-07	3,00	0,995
AlMg3-BM-FCG-LT1	7,08E-08	3,32	0,997	5-FSW-FCG-WM2	1,19E-07	3,15	0,997
AlMg3-BM-FCG-LT2	1,78E-08	3,84	0,996	5-FSW-FCG-R1	5,00E-08	3,50	0,997
AlMg3-BM-FCG-LT3	1,07E-07	3,22	0,993	5-FSW-FCG-R2	4,69E-08	3,47	0,993
AlMg3-BM-FCG-LT4	1,11E-07	3,21	0,988	5-FSW-FCG-A1	1,61E-08	3,80	0,993
AlMg3-BM-FCG-LT5	7,69E-08	3,34	0,996	5-FSW-FCG-A2	3,98E-08	3,50	0,998

5. táblázat. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokból meghatározott Paris-Erdogan állandók (C és n , $MPam^{1/2}$ -mm/ciklus) és a korrelációs indexek (r).

ÖSSZEZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett vizsgálatok és azok eredményei alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- A vizsgálati eredmények megbízható (lásd a korrelációs együtthatókat is) és reprodukálható vizsgálatokra utalnak.
- Az FSW kötésekben elvégzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei igazolják a hegesztéstechnológia alkalmazhatóságát. Az a tény, hogy az 5754-H22 anyag FSW hegesztett kötéseinak nagyciklusú fáradással szembeni ellenállása alig fele az alapanyagénak, felveti a hegesztéstechnológia további finomításának lehetőségét, illetve igényét.
- A két, lényegében azonos, alapanyagon (AlMg3 és 5754-H22) elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei orientációnként (T-L és L-T) azonosnak tekinthetők. A mérhető (s = 12 mm és s = 6 mm) szignifikánsan nem mutatható ki. Mindezek lehetővé teszik az eredmények általánosabb alkalmazhatóságát.
- Az 5754-H22 anyag FSW kötéseiben a repedések terjedése szignifikánsan eltérőnek tekinthető, attól függően, hogy azok a kötés közepén, a kötés szélein vagy a kötés hossz tengelyére merőlegesen haladnak.
- Saját vizsgálataink eredményei jó összhangban vannak az összehasonlításra használt anyagminőségeken, illetve hegesztett kötésekben kapott eredményekkel.
- Statisztikailag megalapozottabb következtetések megfogalmazása további vizsgálatokat igényel.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

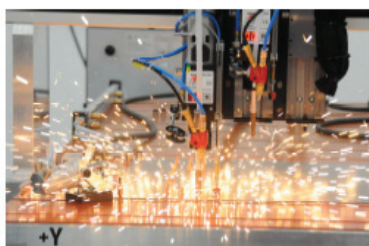
A cikkben ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge: Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. Materials Science and Engineering, A280 (2000) pp. 37–49.
- [2] P. Tindall: Aluminium in bridges. ICE Manual of Bridge Engineering. Institution of Civil Engineers, 2008. pp. 345-355. doi: 10.1680/mobe.34525.0345.
- [3] C. B. Fuller, A. Krause, D. C. Dunand, D. N. Seidman: Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminum alloy modified by Sc and Zr additions. Materials Science and Engineering, A338 (2002) pp. 8-16.
- [4] Friction Stir Welding. <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/>
- [5] R. S. Mishra, Z. Y. Ma: Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, R 50 (2005) pp. 1–78.
- [6] A. Kostirvas, J. C. Lippold: Weldability of Li-bearing aluminium alloys. International Materials Reviews, Vol. 44, No. 6 (1999) pp. 217-237.
- [7] Z. Barlas, U. Ozsarac: Effects of FSW Parameters on Joint Properties of AlMg3 Alloy. Welding Journal, Vol. 91, January (2012) pp. 16-s-22-s.
- [8] M. Vural, A. Ogur, G. Cam, C. Ozarpa: On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-0 and EN AW 5754-H22. Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 28, Issue 1, January (2007) pp. 49-54.
- [9] J. Li: The effect of microstructure and texture on high cycle fatigue properties of Al alloys (2007). University of Kentucky Doctoral Dissertations. Paper 522. http://uknowledge.uky.edu/gradschool_diss/522

- [10] P. M. G. P. Moreira, A. M. P. Jesus, A. S. Ribeiro, P. M. S. T. Castro: Fatigue Crack Growth Behaviour of the Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminium Alloy. *Mecânica Experimental*, Vol 16 (2008) pp. 99-106.
- [11] J. Adamowski, C. Gambaro, E. Lertora, M. Ponte, M. Szkodo: Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6. *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 28, Issue 8, August (2007) pp. 453-460.
- [12] M. Ericsson: Fatigue strength of friction stir welded joints in aluminium. Doctoral Thesis. Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm (2005). ISBN 91-7178-001-7, ISRN KTH/MSE—05/07—SE+MAT/AVH.
- [13] H. Nakazawa, S. Kodama: Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves. *Statistical Research on Fatigue and Fracture*. Eds.: T. Tanaka, S. Nishijima, M. Ichikawa. Current Japanese Materials Research, Vol. 2. Elsevier Applied Science, London-New York (1987) pp. 59-69.
- [14] ASTM E 647: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates (1988).
- [15] P. Paris, F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME (1963) pp. 528-534.

Cégünk új telephelyre költözött, ahol megújult környezetben, változatlanul magas színvonalú szolgáltatásokkal és magas minőségű SOYER termékekkel várjuk régi és új ügyfeleinket. Keressen fel minket és tudjon meg többet a csaphegesztés technológia páratlan előnyeiről.



Soyer Magyarország Kft.
Alba Ipari Zóna
8000 Székesfehérvár Babér u. 14.
Tel: 22/504-427
info@soyer.hu
www.soyer.hu



Az újonnan épült csarnokban, lehetőség nyílik telepített KTS-1550 CNC munkaállomáson történő, **dokumentált minőségű bémunka** végzésére. Kérje, személyre szabott ajánlatunkat.



A leggazdaságosabb megoldás az emberi hibák kizárására
Gyártást támogató LED Kijelző



BMS-9 csaphegesztő PS-9 hegesztőpisztoly
Az új fejlesztés lehetővé teszi, hogy a kezelő az üzemi állapotot, egy, a forgalmi lámpák elvén működő LED segítségével gyorsan felismerhesse.

A körívű LED kijelzőnek köszönhetően az üzemi állapot bármilyen szögből leolvasható. (Szabadalmi szám: DE 102010 001 629.2). A hagyományos csapartókkal ellentétben, az új típusú befogópatronnál nem szükséges a csapkilógást egyesével beállítani és a csapartót a különböző hosszúságú (6-40mm) csapokhoz igazítani. Így használatával nemcsak időt takarít meg, de egyben kizárja a csapartó rossz beállításából eredő hibákat.

Transzformátoros eljárás és inverter technológia



Az ívhúzásos csaphegesztés a maximális terheléshez való csaphegesztési eljárás. Ez az eljárás lehetővé teszi a 6-25mm átmérőjű hegesztőcsapok magas minőségű illesztését Alkalmazhatóság: gépjármű építés, hajóépítés, acélipar, hidépítés. Az inverteres csaphegesztő berendezésekbe **integrált SRM technológia** segítségével lehetőség nyílik anyák, csövek, csavarok teljes keresztmetszetben történő felhegesztésére.



KIS TELJESÍTMÉNYŰ ELJÁRÁS VÁLTOZATOK ÉS AZ ANYAGÁTVITEL MÓDJAI A FOGYÓELEKTRÓDÁS HEGESZTÉS TERÜLETÉN

LOW POWER ARC WELDING PROCESS VARIANTS AND THE MATERIAL TRANSFER AT THE GAS METAL ARC WELDING

Somoskői Gábor*

Abstract

The modern, clock-controlled power sources with the support of digital technology permits better welding processes and solves several problems of metal joining. The article tries to make differences between the lots of welding process variants existing on today welding machine market. It shows in details the low power process variants, namely in the short-arc range.

1. Bevezetés

A hegesztőgép gyártók és fejlesztők az elmúlt néhány évben több, hangzatos nevekkel ellátott eljárás változatot fejlesztettek ki. Bár az elnevezések először ügyes marketingfogásnak tűnnek, ez a folyamat adekvát válasz a hegesztőiparban keletkezett új problémákra.

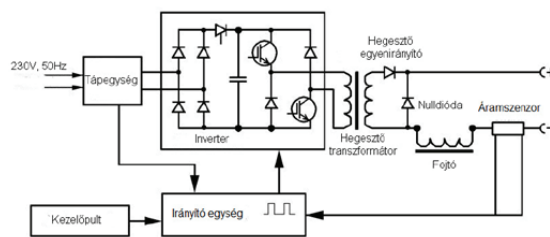
A fejlesztőkön nagy a piaci nyomás, a teljesség igénye nélkül az alábbi megoldandó kérdésekre várnak a gépek felhasználói megoldást:

- szerkezet súlyának csökkentése
- falvastagság csökkentése
- bevonatok (horgany, foszfátózás, stb.) alkalmazása
- növelt szilárdságú alapanyagok használata
- hegesztett szerkezetet elvárt gyártási pontosságának növekedése
- gazdaságossági mutatók (sebesség, beolvadási mélység, leolvadási teljesítmény) növekedése
- füst kibocsátás csökkentése
- zajszint csökkentése

2. Áramforrások villamos viselkedése

A tendenciát az tette lehetővé, hogy az áramforrások villamos konstrukciója az elmúlt években hatalmas fejlődésen ment keresztül. (1. ábra) A digitális technika és az órajel alapján vezérelt és szabályozott villamos gépek egyedi, eddig nem megvalósítható anyagátvételi módokat tesznek lehetővé. Lehetővé vált, hogy akár a cseppátmenet létidejének törtresze alatt a villamos gép (hegesztő gép) beavatkozzon a folyamatba és az optimális anyagátvitel megvalósításának céljából megváltoztassa a villamos jellemzőket. Itt elsősorban a dinamikáról és a feszültségről van szó.

Tovább növeli a lehetőségeket, hogy egyes eljárás változatok esetén a huzal előtoló is integrált a teljes szabályzási folyamatba, így lehetőség van az huzal előtolási sebesség intuitív változtatására, eddig nem tapasztalt szabályzási gyorsasággal. Így kellőképpen összetett többváltozós függvények hozhatók létre. A független változó általában az idő, a feszültség és ezen keresztül a rövidzár indikálása, valamint az áramerősség. A függő változó az áramforrás dinamikája, a huzal előtolási sebesség, az áram és feszültség időbeli lefolyása lehet.



1. ábra. Digitális áramforrás felépítése [1]

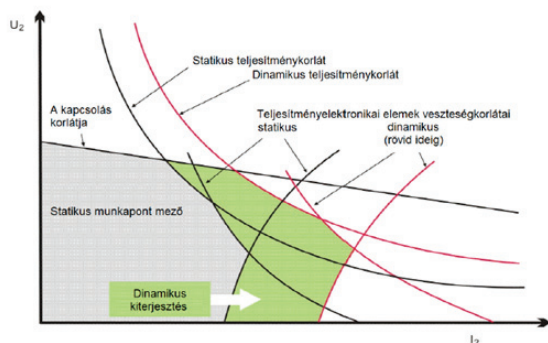
Így a hegesztő gép szabályozása felfogható egy vektor – vektor függvényként. A bemenő, független változók az áramerősség, a feszültség, az idő és a huzal előtolási sebesség, míg a függvényértékek a dinamika (az áramerősség változásának sebessége) és kialakult ívfeszültség.

Hagyományos áramforrások statikus terhelési jelleggörbéjét az áramforrás és a kiegészítők (összekötő kábelek, hegesztőpisztoly, végső soron maga a munkadarab is) felépítése, annak ohmos, induktív és kapacitív ellenállása határozza meg. Az áramforrás villamos tulajdonságainak (elektromechanikus, mágneses vagy elektronikus úton lehetséges) megválasztásával az adott alkalmazásnak megfelelő áram- vagy feszültségtartó jelleggörbe állítható be. Ezzel szemben az irányított (a mindenkori rendelkező jel idő- vagy feltételfüggő változtatásával) az áramforrás villamos felépítése által megszabott korlátokon belül elvileg bármilyen statikus terhelési jelleggörbe beállítható és használható. (2. ábra)

A digitális áramforrások szabályozási sebességét az áramforrás dinamikus reakcióidejével is mérhetjük. Ez a fenti vektor - vektor függvény differenciáltja

* PhD hallgató

és azt határozza meg, hogy a független változók megváltozása esetén a kimeneti jelek milyen "gyorsan" változnak meg a programozott függvénynek megfelelően és hogyan alakulnak ki az új feltételeknek megfelelő paraméterek. (2. ábra)

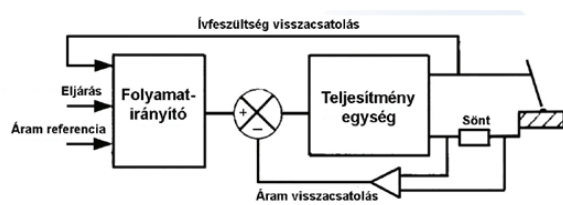


2. ábra. Áramforrások statikus és dinamikus viselkedése [1]

Ezt a sebességet befolyásoló tényezőt két részre lehet osztani:

- A szabályzó kör idő szükséglete ahhoz, hogy a változás villamos paramétereit megmérje, az adatokat feldolgozza, és létrehozza a függvénynek a megváltozott feltételeknek megfelelő rendelkező jeleket. A szabályozás sebességének növelése számára a kapcsoló üzemű tápegység vezérlőjének frekvenciája jelent korlátot.

A teljesítmény egység reakcióidejét (a megváltozott rendelkező jelre) az áramforrás belső és a hegesztőáramkör induktivitása, kapacitása és ellenállása szabja meg. Ez az áram növekedési és csökkenési sebességével mérhető, és az áram tranziens viselkedésével írható le. Ezt a köznapi szóhasználat dinamika, vagy fojtás néven ismeri. A kapcsolóüzemű áramforrások kapcsolási frekvenciája tehát közvetlen hatással van a berendezés dinamikus viselkedésére. (3. ábra) Így a növekvő kapcsolási frekvencia a teljesítményegység reakcióidejének csökkenésével is jár. Egy, ma már hagyományosnak mondható tirisztoros áramforrás 50Hz körüli kapcsolási frekvenciája mellett 10A/ms áramnövekedési sebességet (dinamikát) lehet elérni, addig egy 100 kHz kapcsolási frekvenciájú digitális hegesztőgépnél ez akár 1000A/ms értékű is lehet.



3. ábra. A hegesztési folyamat vezérlése [1]

A hegesztő áramforrások fejlesztése jelenleg az áramforrások reakcióidejének csökkentésére, ezzel a dinamikus viselkedés befolyásolásának nagyobb lehetőségére irányulnak. Lehetővé vált olyan eljárás változatok megalkotása, ahol a csepplévéálást és ezen keresztül az anyag átmenetet az áram időbeli lefutásának modulációjával hozzák létre (STT, CMT). Természetesen a megfelelő teljesítményelektronika vezérléséhez a szoftverek fejlesztése és integrálása az ipari folyamatba is szükségesség vált.

Az eljárás változatok megjelenésének előnyei mellett számos hátrány jelentkezik, megoldandó kérdés vetődik fel. Az egyértelmű, hogy ezek a modern eljárás változatok a fogyóelektródás ívhegesztés (GMAW) családjába tartoznak. De a WPS (Welding Procedure Specification, Hegesztési Utasítás) szempontjából mennyire tekinthető egymással kompatibilisnek a különféle gyártók által alkalmazott technológiák?

Az American Welding Society (AWS) szerint "a WPS provides in detail the required welding variables for specific application to assure repeatability by properly trained welders", vagyis a WPS részletesen leírja a hegesztési munkarend változóit egy adott feladat elvégzéséhez oly módon, hogy az minden tekintetben megismételhető legyen a megfelelően kiképzett hegesztő számára. Ezért nagyon fontos, hogy a felhasználók korlátozása helyett, hogy milyen hegesztő berendezéseket használhatnak a WPS szerint, megteremtjük ezen eljárás változatok osztályozását. Így könnyen lehetővé válik a különböző fantázia nevek mögött megbújó műszaki megoldások egyértelmű összehasonlítása és adott esetben kompatibilitása.

3. Eljárás változatok rövidzáras anyagátvitel esetén

A rövidzáras hegesztés esetén az anyagátmenet sorozatos rövidzárak fellépése mellett valósul meg. A rövidzár pillanatában a hagyományos hegesztőgépek dinamikáját az alkalmazott villamos megoldások (transzformátor, fojtó tekercs, egyenirányító működési sebessége) és a külső tényezők, kábelek, hegesztő pisztoly és a munkadarab határozza meg. Az alábbi peremfeltételek határozzák meg az ív stabilitását, ezek megváltozása erős fröcskölést, szegély beégést, hidegkötést eredményez.

- huzal előtolási sebesség
- szabad huzalhossz
- az ívben lejátszódódó sztochasztikus mágneses és gázdinamikai folyamatok
- a hegfürdőben fellépő Marangoni hatás
- a munkadarab felületi szennyeződése
- hálózati feszültség
- pisztolytartás

A 100 kHz nagyságú órajellel vezérelt digitális szabályzású áramforrások a cseppleválás létideje alatt képesek beavatkozni a folyamatba, azt pozitívan szabályozva. Az optimalizált, esemény vezérelt szabályzással a rövidzáras hegesztés fent említett hátrányai teljesen kiküszöbölhetőek.

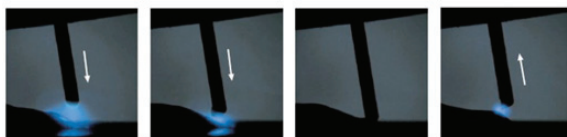
A különböző gyártók divatos hangzású nevek alatt hoztak létre ilyen eljárás változatokat, ezek nagy részét szabadalmaztatták is, de mindegyikben a közös az, hogy a rövidzárlati viselkedést és az ív újragyújtását szabályozzák. Az alkalmazott módszerek két csoportba sorolhatók. Az egyes típusnevek csoportosítása a 6. ábrán látható.

- A huzal előtolási sebesség állandó és a cseppleválást valamint az ív újragyújtását villamos impulzussal segítik.
- A rövidzárlati fázisban a huzalt visszahúzzák és így a cseppleválás árammentesen, a felületi feszültség hatására történik meg.



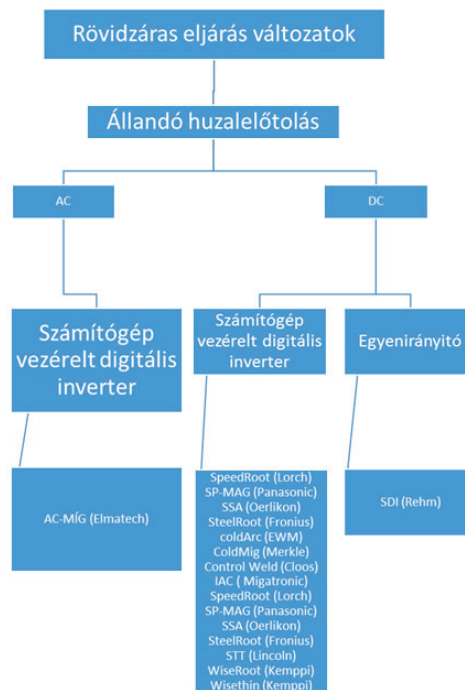
4. ábra. Áramimpulzussal segített cseppátmenet [2]

Az alkalmazott villamos impulzus szerepe a cseppleválás egzakt megvalósítása. Szabályozható a nagysága, valamint az, hogy a rövidzár pillanatához képest mikor következzen be időben. (4. ábra) További előny, hogy a hő bevitel és az ív nyomása, ezen keresztül a beolvadás nagyon jól kézben tartható és szabályozható.



5. ábra A CMT eljárás cseppleválása

Ha a huzal előtolási sebességet is integráljuk a szabályzási folyamatba, az anyagátmenetet még tovább finomíthatjuk. Ezen az elven alapul a STT eljárás. A berendezés két huzal előtolóval rendelkezik. Az első feladata a folyamatos és stabil, pontos huzal előtolási sebesség létrehozása. A második a hegesztő pisztolyba épített és alkalmas a huzal előtolás irányát megváltoztatni több tucatszor a másodperc alatt. Ezáltal egy két lépés előre, egy lépés hátra mozgást kapunk. Speciális puffert szükséges a két előtoló között.

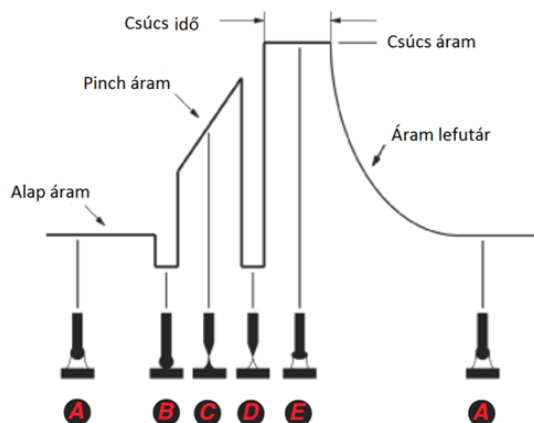


6. ábra. Eljárás változatok csoportosítása [[1]]

Amikor a huzal megérinti a munkadarabot, rövidzár keletkezik. A digitális szabályzás ezt érzékelve a hegesztő áram lecsökkenti, és az ívet megszakítja. Ezáltal a rövidzáras hegesztésre jellemző fröcskölés teljesen megszűnik. További előny a hő bevitel csökkenése, hiszen csak a folyamat egy részében ég az ív. A huzal visszahúzása által a hegesztési fürdő felületi feszültsége a felelős a cseppleválásért. Rögtön a cseppleválás után a huzal újra előre halad, az áramerősség megnő és a folyamat újra indul, ahogy az 5. ábrán látható. [4]

Az eljárás főbb jellemzői a következők:

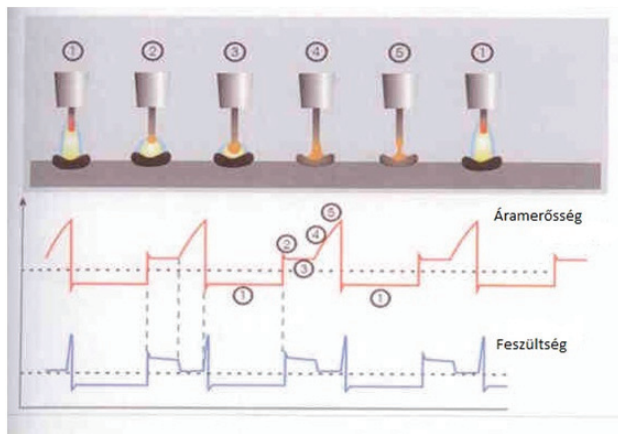
- Szabályzási rendszerbe integrált huzal előtolási módszer
- Fröcskölés mentes hegesztési folyamat
- Nagyon alacsony hő bevitel
- Stabil ív



7. ábra. Lincoln STT eljárás áram függvénye

Egyik eljárás a Lincoln cég által kifejlesztett STT (Surface Tension Transfer), főleg távvezetékek csöveinek gyökhegesztésére alkalmas. Az anyagátvitelért ebben az esetben is a felületi feszültség felelős. (7. ábra) Az ábrán jól látható, mennyire komplex áramerősség – idő függvény valósítható meg. Az eljárás változat hátránya, hogy a hegesztő pisztolyon és a földkábelén kívül egy további villamos kábel szükséges a rövidzárlat pillanatának érzékeléséhez.

Vékony lemezek, illetve nagy illesztési hézag esetén alkalmazható néhány gyártó váltóáramú megoldása. [3] Az elektróda negatív polaritása alatt a nagyobb hő terhelés miatt a képződő csepp nagyobb méretű, ami jó résáthidaló képességet tesz lehetővé. Azonban így a hő bevitel és a beolvadási mélység kisebb lesz. A pozitív és negatív fázis aránya tetszőlegesen meghatározható, így a hő bevitel és a leolvadási teljesítmény széles határok között kézben tartható. (8. ábra)



8. ábra. Váltóáramú eljárás változat jellemző feszültség – áramerősség jelleggörbéje [[3]]

4. Összefoglalás

Látható, hogy a felhasználók által állított bonyolult követelmény rendszernek a hegesztő berendezések gyártói és fejlesztői komplex megoldásokkal szolgálnak. A cikkben csak a kis teljesítményű, rövidzáras ívre jellemző eljárásváltozatot ismertettem. Ezen túl mind az impulzus hegesztés területén, mind a hagyományos finomcseppes anyagátvitel esetén hasonlóan összetett rendszerek léteznek. Megfontolandó ezen eljárás változatok részletes tárgyalására és osztályozására is.

Világos, hogy a fejlesztések nagymértékben képesek a hagyományos fogyóelektródás hegesztésről alkotott képünk megváltoztatására. Megoldásokat kínálnak olyan problémákra, amelyek korábban vagy nem léteztek, vagy együtt kellett velük élnünk a hagyományos eljárások korlátai miatt. Azonban a villamos gépek, berendezések, a szoftverek fejlesztése ellenére sem tudunk olyan problémákat megoldani, mint az egyenetlen illesztési hézag, a felületi szennyeződések hatása, vagy a hegesztő pisztoly mozgatásából eredő egyenetlenségek. A berendezések villamos viselkedésének, dinamikai és transziens tulajdonságainak széles határok között történő szabályozhatósága nem változtatja meg az ív fizikáját és cseppátmenet törvényszerűségeit.

5. Irodalom

- [1] Kristóf, Cs; Pálinkás, L: Ívhegesztő áramforrások dinamikus viselkedése, Előadás, Mesterkurzus az Óbudai Egyetemen 2013.09.06
- [2] Prof. Dr.-Ing Cramer, H; Dipl.-Ing Dudziak, M: Overview of modern arc processes and their material transfer in the case of gas-shielded metal-arc welding, Welding and Cutting 2012.05, p: 319-325
- [3] Jaeschke, B: Der wirtschaftliche MSG-Lichtbogenschweißenprozess durch moderne Gerätetechnologien, DVS-Berichte Vol. 267, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2010
- [4] Somoskői, G: A CMT eljárás elméleti alapjai és gyakorlati alkalmazási lehetőségei, 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2010. május 19-21, p: 271-273

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projektben 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 Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

BESZÁMOLÓ AZ I. HEGESZTÉSI NYÁRI EGYETEMRŐL

REPORT ON THE 1ST SUMMER UNIVERSITY ON WELDING

Dobosy Adám, Gáspár Marcell*, Prém László*, Meilinger Akos***

BEVEZETÉS

Tavaly, 2012 júniusában a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen megalakult a Gépipari Tudományos Egyesület Hegesztési Szakosztályának Ifjúsági Fóruma. Az alapító ülésen a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, a Dunaújvárosi Főiskola, a Miskolci Egyetem, valamint az Óbudai Egyetem képviselői vettek részt. A szervezet - amelynek célja a fiatal, hegesztés iránt érdeklődő egyetemisták, iparban dolgozó mérnökök összefogása, közös rendezvények szervezése - már több sikeres rendezvényt is lebonyolított. Legutoljára került sor a 2013 júliusában megrendezett I. Hegesztési Nyári Egyetemre.

A Nyári Egyetemet az Ifjúsági Fórum és a Miskolci Egyetem Hegesztési Szakosztálya (MEHESZ) közösen szervezte, a Mechanikai Technológiai Tanszék (ME) támogatásával. A helyszínt a Miskolci Egyetem biztosította. Az eseményre július 5 és 7. között került sor, amelyen – a szervezők legnagyobb örömeire – nemcsak a négy alapító intézmény hallgatói vettek részt, hanem más egyetemek is képviseltették magukat.



A háromnapos rendezvényen összesen mintegy 60 fő jelent meg. Legnagyobb létszámban a Miskolci Egyetem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint az Óbudai Egyetem hallgatói voltak, de érkeztek diákok a Dunaújvárosi Főiskoláról, a Nyíregyházi Főiskoláról, illetve a Kecskeméti Főiskoláról is. Mindemellett jelentős számban képviseltették magukat a hegesztés területén meghatározó magyarországi cégek is,

akik gépbemutatókkal és előadásokkal is hozzájárultak a programhoz.

SZAKMAI PROGRAMOK ÉS ISMERKEDÉS

Az első napon miután a résztvevők elfoglalhatták a szállásaikat az Ifjúsági Fórum elnöke Bakos Levente, valamint a Nyári Egyetem egyik főszervezője Gáspár Marcell Gyula tartott hivatalos megnyitót. Ezután, az eseménynek otthont adó Mechanikai Technológiai



Tanszék vezetője, Prof. Dr. Tisza Miklós köszöntötte a résztvevőket, egyúttal röviden bemutatta a tanszéken folyó aktuális kutatásokat.

A megnyitót követően került sor az első szekcióra, amelynek központi témája a korszerű, nagyszilárdságú acélok, illetve ezek hegeszthetősége volt. Dr. Tisza Miklós röviden összefoglalta a különböző szilárdságnövelési módszereket és napjaink korszerű nagyszilárdságú acélfejlesztési irányzatait az autóipar területén, majd Gáspár Marcell PhD hallgató tartott előadást a nagyszilárdságú acélok hegesztési nehézségeiről. Az előadás során a résztvevők megismerkedhettek a nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztése során felmerülő problémákkal (pl. hidegrepedések, szívósság csökkenés), és azok lehetséges elkerülésével. Ezt követte a Fortaco Zrt. - korábban RUUKKI Tisza Zrt. – részéről Sas Illés hegesztési felelős prezentációja a nagyszilárdságú acélok hegesztési tapasztalatairól. Ennek keretében a résztvevők megismerkedhettek a vállalat nagyszilárdságú acélból készülő hegesztett kivitelű

* PhD hallgató

** tanársegéd

termékeivel, a hegesztéstechnológia tervezésének lépéseivel, valamint a leggyakrabban előforduló minőségi problémákkal. A szekció zárásaként a résztvevők tehettek fel kérdéseket az elhangzott témában.



Egy rövid szünet után a Mechanikai Technológiai Tanszék Hegesztő és Anyagvizsgáló Laboratóriumainak bemutatása, valamint a Migatron Kft. bemutatója következett. Ennek során részletesebben megismerkedhettek a hallgatók a tanszék legmodernebb eszközeivel, illetve főbb kutatási területeivel is. Az állomások között szerepelt egy lineáris dörzshegesztési (FSW) bemutató, amelynek során Meilinger Ákos (tanársegéd, ME-MTT) ismertette a technológiai lényegét, előnyeit, felhasználási lehetőségeit, miközben bemutatta a lineáris dörzshegesztett kötések létrehozásának menetét. Kapcsolódva a nagyszilárdságú acélok hegesztési nehézségeiről szóló előadásokhoz, bemutatásra került a WeldQAS folyamatfelügyelő rendszer, amelynek működéséről, alkalmazhatóságáról a hegesztéstechnológiában Dobosy Ádám (PhD hallgató, ME-MTT) tartott bemutatót. A következő állomáson a Migatron Kft. bemutatóját tekinthették meg a résztvevők, ennek során az AWI technológia legmodernebb lehetőségeit tanulmányozhatták, amelyek közül kiemelkedő volt a termelékenység növelését célzó



hideghuzalos előtoló egység bemutatója. Utolsó állomásként a GLEEBLE fizikai szimulátor bemutatójára került sor. Ennek során Dr. Kuzsella László (egyetemi docens, ME-MTT) tartott rövid

bemutatót, elsősorban a hegesztés területén hasznosítható vizsgálati lehetőségekről, mint a melegrepedés érzékenység vizsgálata, vagy a hőhatásövezet szerkezetének szimulálása.

Az első napi program zárásaként Tállyai borkóstoláson és vacsorán vettek részt a Nyári Egyetem résztvevői, ahol kötetlen beszélgetésekre, ismerkedésekre, kapcsolatépítésre került sor.

ELMÉLET ÉS GYAKORLAT

A második nap délelőttjén az ellenálláshegesztése volt a főszerep. A szekció első előadásában Dr. Török Imre röviden összefoglalta az ellenálláshegesztés elméleti alapjait, majd ezt követően Prém László PhD hallgató tartott előadást a Mechanikai Technológiai Tanszéken jelenleg folytatott autóiipari vékonylemezek ellenállás-ponthegesztésének kutatásáról. A hallgatók betekintést nyertek a különböző hidegalakítási mértékű DC01 jelű lágyacél karosszériaelemek folyamatos és szakaszos energiabevitelű ellenállás-ponthegesztésének lehetőségeiről, valamint a nagyszilárdságú Dual-Phase acélok autóiipari alkalmazásáról, ponthegeszthetőségéről. A szekció zárásaként a Rehm Hegesztéstechnika Kft. részéről Tóth László tartott bemutatót az AC és MFDC technikák alkalmazásának gyakorlati tapasztalatairól, elméleti érdekességeiről.



Egy rövid szünet után a hozag- és segédanyagok területével ismerkedhettek meg részletesebben a jelenlévők. Ennek során a hozaganyag megválasztásának szempontjait mutatta be szerkezeti acélok esetén Bodorkós Gergely a Rechen Hegesztőház Kft.-től. Ezt követően a védőgázok szerepéről a SIAD Kft. részéről Kerekes Zoltán tartott előadást.

A délután folyamán a Froweld Kft. tartott előadást a korszerű hegesztő berendezésekről és eljárásokról, illetve hegesztő gép bemutatóra is sor került a Mechanikai Technológiai Tanszék műhelycsarnokában.

Rövid szünetet követően az érdeklődők esettanulmányokat hallgathattak meg. Négy előadó közül lehetett választani, így mindenki megtalálhatta a számára legérdekesebb témát. Az előadók ipari

tapasztalattal rendelkező hegesztőmérnök voltak, Meilinger Ákos (ME), Kristóf Csaba (MAHEG), Dr. Palotás Béla (DUF) és Dózsa Gábor (FORTACO Zrt.) személyében. Itt egy-egy ipari probléma, gyártási folyamat ismertetése, ezek kiküszöbölésének illetve végrehajtásának menete, vagyis gyakorlati tapasztalatok szerzése volt a főszerep. A témák között volt pirolízis kemence csőfüggönyének hegesztéstechnológiájának kidolgozása, egy céghez bekerülő gyártmány hegesztési tervének elkészítése, egy csőtávvezeték hegesztéstechnológiájának kidolgozása, valamint egy nagyszilárdságú acél hegesztéstechnológiájának kidolgozása.



Az I. Nyári Egyetem szakmai programját – az igen sikeres - Hajógyári kerekasztal beszélgetés zárta. Ennek során volt hajógyári mérnökök élménybeszámolóit, történeteit élvezhették a jelenlévők, kiegészítve a volt Hajógyár rövid történetével. A meghívottak között volt Dr. Hajós Sándor, Kristóf Csaba, Dr. Palotás Béla, Nagy Ferenc valamint Markó Péter.

Zárásként a szervezők megköszönték az igen aktív részvételt, valamint a nagyszámú szakmai résztvevő munkáját. Ezután került sor a részvételt igazoló emléklapok átadására.



Levezetésként a résztvevők a Miskolc-Tapolcai Barlangfürdőben vehettek részt éjszakai fürdőzésen, amelynek során ismét lehetőség nyílt a kötetlen beszélgetésre és ismerkedésre.

ÖSSZEZÉS

A szervezők nagy öröme az I. Hegesztési Nyári egyetemen összesen mintegy 60 fő vett részt, legnagyobb számban a reményeknek megfelelően hallgatók. Emellett azonban jelentős számban



képviseltették magukat a hegesztés területén meghatározó cégek is. A visszajelzések alapján mind a résztvevők mind az előadók igen jó benyomással távoztak az eseményről így reményeink szerint jövőre a második nyári egyetemet is megrendezésre kerül, akár hosszú távú hagyományt teremtve ezzel.

A szervezők itt szeretnék megköszönni, minden résztvevő ipari partner támogatását, akik látványos bemutatóikkal még tovább színesítették a programokat.

A teljes támogatói és előadói lista - ami a jövőben remélhetőleg még tovább fog bővülni - a következő:

- ✓ AKG Alföldi és Kohászati Gépipari ZRt.
- ✓ ESAB Kft.
- ✓ FORTACO ZRt.
- ✓ FROWELD Kft.
- ✓ Gépészmérnöki és Informatikai Kar Hallgatói Önkormányzat
- ✓ Migatron Kft.
- ✓ RECHNEN Hegesztőház Kft.
- ✓ REHM Hegesztéstechnika Kft.
- ✓ SIAD HG Kft.
- ✓ MAHEG
- ✓ Miskolci Egyetemisták Szövetsége

A szervezők továbbá szeretnék megköszönni a Hegesztési Szakosztály Ifjúsági Fórumának, a rendezvénynek helyet adó Miskolci Egyetemnek, valamint a Mechanikai Technológiai Tanszéknek a segítségét, amely a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt keretében biztosította a rendezvény sikerét, valamint az eseményen résztvevő valamennyi cég támogatását.

A HEGESZTÉSI NYÁRI EGYETEM RÉSZLETES SZAKMAI PROGRAMJA

Szekció megnevezése	Téma leírása	Előadók
Nagyszilárdságú acélok, hegeszthetőségük	Nagyszilárdságú acélok fogalma, csoportosítása és lehetséges típusai. Nagyszilárdságú acélok hegeszthetősége. Gyakorlati tapasztalatok a nagyszilárdságú acélok hegesztésében.	• Prof. Dr. Tisza Miklós (ME-MTT), • Gáspár Marcell (ME-MTT), • Sas Illés (FORTACO Zrt.)
Laborlátogatás és Migatronik Kft. bemutató	ME MTT Hegesztő és Anyagvizsgáló laboratóriumainak megtekintése, valamint a Migatronik Kft. hegesztőgép bemutatója.	• Meilinger Ákos (ME-MTT), • Kuzsella László (ME-MTT), • Dobosy Ádám (ME-MTT), • Migatronik Kft.
Ellenállásponthegesztés a járműiparban	Ellenállásponthegesztés elmélete, valamint új kutatási eredmények ismertetése vékonylemezek ellenállásponthegesztéséről. Az ellenállásponthegesztő gépek fejlesztési irányai.	• Dr. Török Imre (ME-MTT), • Prém László (ME-MTT), • Tóth László (Rehm Hegesztéstechnika Kft.)
Hozag- és segédanyagok a hegesztésben	Hozaganyag a gyártásától a felhasználásig: tervezés, kiválasztás, alkalmazás. Hegesztési segédanyagok szerepe.	• Bodorkós Gergely (Rechnen Hegesztőház Kft.), • Kerekes Zoltán (SIAD AG Kft.)
Hegesztő berendezések	Korszerű hegesztőberendezések és eljárások alkalmazhatósága az egyes anyagminőségek esetén.	• Somoskői Gábor (Froweld Kft.) • Froweld Kft. hegesztőgép bemutató
Technológiai tervezés, esettanulmányok	Ipari tapasztalattal rendelkező hegesztőmérnök egy-egy, az iparban megjelenő probléma, gyártási folyamat kapcsán mutatják be a technológiai tervezés, problémamegoldás folyamatát.	• Dr. Palotás Béla (DUF), • Kristóf Csaba (MAHEG), • Dózsa Gábor (FORTACO Zrt.), • Meilinger Ákos (ME-MTT)
Hajógyári kerekasztal beszélgetés	A volt hajógyári mérnökök osztják meg tapasztalataikat és élményeiket képek és technológiák bemutatásán keresztül.	• Dr. Hajós Sándor, • Kristóf Csaba, • Dr. Palotás Béla, • Nagy Ferenc, • Markó Péter



KISCIKLUSÚ FÁRASZTÁSNÁL MEGHATÁROZOTT MÉRŐSZÁMOK MEGBÍZHATÓSÁGA

RELIABILITY OF THE MATERIAL CHARACTERISTICS EVALUATED ON LOW CYCLE FATIGUE TESTING

Nagy Gyula, Dobosy Ádám**, Lukács János****

ABSTRACT

The publication presents the analysis of the reliability of the measured parameters during the low cycle fatigue test with the elaboration a big amount of results. Establish that the standard deviation of the full and the plastic strain amplitude remain under 1% or 2%. The standard deviation coefficients of the stress amplitude were smaller than the other stress-like parameters determined by material testing. The standard deviation coefficients of the cycles to the failure were relatively large, located between 8% and 15%. The standard deviation coefficients of the invested total plastic deformation work until failure located between 7% and 16%, and the plastic deformation work invested in single cycle located between 2% and 7 %.

1. BEVEZETÉS

A berendezések, szerkezetek, gépalkatrészek jelentős részét ma is folyáshatárra méretezik. Az anyag és energiatakarékosság, a szerkezetekkel szemben támasztott egyre növekvő követelmények arra készítetik a tervezőket és a gyártókat, hogy az ésszerű kockázatvállaláson belül növeljék a terhelhetőséget. Ugyanakkor, a folyáshatárra elvégzett helyes méretezés mellett is számolni kell a szerkezeti elemek, alkatrészek egyes helyeinek túlterhelésével, amelyek a szivós anyagok képlékeny alakváltozását okozzák. Abban az esetben, ha a kedvezőtlen hatások többször ismétlődnek, a képlékeny alakváltozások is ismétlődnek, ami végül is viszonylag kisszámú igénybevétel után repedések kialakulásához, majd töréshez vezethet.

A jelentős technikai fejlődés következménye az is, hogy egyes berendezéseket a gyors erkölcsi elavulás miatt viszonylag rövid élettartamra célszerű tervezni. A méretezés tekintetében ez azt is jelenti, hogy a terhelések során megengedik a folyáshatárt meghaladó

feszültségek fellépését, azok korlátozott számú ismétlődését, számolnak a kisciklusú fáradás bekövetkezésének lehetőségével. Természetesen e méretezési szemlélettel elérhető, hogy a termékek, szerkezetek tömege, ára kisebb lesz.

A gyártás során alkalmazott technológiák esetén is előfordul a képlékeny alakváltozás ismétlődése, amelynek korlátozott volta a termék előállítását akadályozhatja.

A méretezés, az ellenőrzés, illetve a gyártástervezés alapkövetelménye, hogy a tervezők rendelkezésére álljanak olyan, anyagjellemzők, anyagi mérőszámok, amelyek megfelelően kifejezik a felhasznált anyag teherbíró képességét. E mérőszámok meghatározása az anyagvizsgálat feladata. Az anyagjellemzők, anyagi mérőszámok egységes meghatározása megköveteli azt, hogy a vizsgálatok gondosan körülhatárolt feltételek mellett folyjanak. Ezt az anyagvizsgálati módszerek szabványosításával lehet biztosítani [1, 2]. A vizsgálatokból meghatározható és méretezésnél, ellenőrzésnél felhasználható adatok tekintetében a szabványosítás mellett sem egységes a szakirodalom [3, 4]. Még kevesebb információ áll rendelkezésre a különböző mérőszámok meghatározásának pontosságáról, megbízhatóságáról. Mindezeket szem előtt tartva, jelen tanulmány célja az egyes mérési eredményekből meghatározott mérőszámok, méretezési, ellenőrzési adatok bizonytalanságának elemzése.

2. A KISCIKLUSÚ FÁRASZTÁS EREDMÉNYEINEK ÉRTÉKELESI LEHETŐSÉGEI

A próbatesteken végzett mérésekből, illetve a regisztrált hiszterézis görbékből a következő adatokat, illetve azok egy részét célszerű meghatározni [5]:

- teljes alakváltozás (nyúlás) amplitúdó, (ϵ_a);
- rugalmas alakváltozás (nyúlás) amplitúdó, (ϵ_{ae});
- képlékeny alakváltozás (nyúlás) amplitúdó, (ϵ_{ap});
- tönkremeneteli kritériumhoz tartozó igénybevételi szám (N_f);
- feszültség amplitúdó, (σ_a). A fáradási keménység/lágyulás miatt ez folyamatosan változik a ciklus-

* ny. egyetemi docens

** PhD hallgató

*** egyetemi tanár

szám függvényében; ezért a $\sigma_a = f(N)$ kapcsolat megadása a feladat;

- feszültség amplitúdó az élettartam 50 %-ánál, (σ_{a50});
- a fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka (W_o , W_r),
- a fárasztás során egy ciklusba bevitt képlékeny alakváltozási munka (W_e).

Tekintettel arra, hogy a kisciklusú fárasztás során az anyagban bekövetkező mikroszerkezeti változások, diszlokációs folyamatok, a mikrorepedések keletkezése és azok növekedése rendszerint összetett, bonyolult folyamat [3], általános leírásukra ma még nem áll rendelkezésünkre megfelelő modell. Az egy-egy részterület leíró, biztatónak nevezhető, kezdeti fizikai modellek pedig nem teszik lehetővé az anyagok makroszkópi viselkedésének leírását. Ennek következménye, hogy az anyagok kisciklusú fárasztása alatt mutatott viselkedésének makroszkópi leírására döntően empirikus összefüggések használatosak. Attól függően, hogy a kisciklusú fárasztást milyen körülmények között végezték, mely tényezők hatása meghatározó a vizsgálati eredményekre, nagyszámú összefüggés született. E munkában csak az állandó nyúlás amplitúdójú vizsgálatoknál meghatározható mennyiségek megbízhatóságának kérdéskörével foglalkozunk. E mérőszámok még mindig két csoportba sorolhatók, egyrészt a képlékeny alakváltozás amplitúdóra (tartományra) épülő, másrészt a képlékeny alakváltozási munkára épülő módszerekre.

2.1. KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁS AMPLITÚDÓRA ÉPÜLŐ ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

A szobahőmérsékleten használható kisciklusú fárasztásnál alkalmazott Manson-Coffin empirikus összefüggés még ma is a legszélesebb körben elterjedt modell annak ellenére, hogy 1954-ben ismertették. Ennek alakváltozás amplitúdóra értelmezett formája:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f' \cdot N_t^c, \quad (1)$$

ahol ε_f' és a c a mérési eredményekből meghatározható jellemzők.

Az összefüggés jó közelítést csak bemetszés nélküli, hengeres próbatestek állandó amplitúdójú és frekvenciájú terhelésénél ad [6]; az eredményeket további számos tényező befolyásolja [1,3].

A mért értékeket rendszeresen kiegészítik a rugalmas alakváltozásra vonatkozó adatokkal is. Mivel a rugalmasan alakváltozásnál érvényes a Hooke-törvény, a feszültség amplitúdó segítségével a rugalmas alakváltozás amplitúdó számítható.

A rugalmas nyúlás amplitúdó a tönkremeneteli ciklusszám függvényében a következő alakban írható fel:

$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot N_t^b, \quad (2)$$

ahol σ_f' és b a mérési eredményekből meghatározható jellemzők.

A teljes alakváltozás amplitúdó (ε_a) a rugalmas és a képlékeny alakváltozás amplitúdók összege:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot N_t^b + \varepsilon_f' \cdot N_t^c. \quad (3)$$

Az alakváltozás amplitúdók meghatározásához még azt a kiegészítést kell tenni, hogy a rugalmas alakváltozás amplitúdó értékét, amely viszonylag kicsi és a mérésnél felrajzolt hiszterézis görbékből a meghatározása bizonytalan, a feszültség amplitúdóból számítjuk [5]; a képlékeny alakváltozás amplitúdót pedig az

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_a - \varepsilon_{ae} \quad (4)$$

képletből.

A kisciklusú fárasztás eredményei információt adnak az anyag fáradási keményedéséről és/vagy lágyulásáról is [6]. Állandó teljes alakváltozás amplitúdóval fárasztott próbatesteknél a feszültség amplitúdó változása miatt a ciklikus folyásgöbét az élettartam 50%-ához tartozó feszültség amplitúdók értékéből határozzuk meg.

A képlékeny alakváltozás amplitúdóra (tartományra) épülő modellek sokfélesége jelzi azt, hogy használhatóságuk korlátozott [7]. Ugyanakkor, ezen mennyiségek fél évszázados alkalmazása során rengeteg tapasztalat halmozódott fel egyrészt a szerkezetek méretezése, ellenőrzése, másrészt pedig a mérőszámok, összefüggések megbízhatósága tekintetében. A méretezés, ellenőrzés megbízhatóságát tovább növelné, ha ismert, illetve nagy lenne a meghatározott mérőszámok megbízhatósága. E tekintetben már vannak vizsgálati eredmények a szakirodalomban, de azok szisztematikus elemzése, kiegészítése mindenképpen indokolt.

2.2. KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁSI MUNKÁRA ÉPÜLŐ MÓDSZEREK

Az értékelési és az élettartam meghatározási módszerek másik csoportjába a képlékeny alakváltozási munkára épülő módszerek tartoznak. Ezek közül kiemelendő a Feltner és Morrow által javasolt összefüggés, amely a hiszterézis görbe alatti terület leírásával határozza meg az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munkát:

$$\Delta W = 4\sigma_a \varepsilon_{ap} 1/(1+m). \quad (5)$$

A kifejezésben a ΔW az egy ciklusba bevitt képlékeny alakváltozási munka, a σ_a a feszültség amplitúdó, az ε_{ap} a képlékeny alakváltozás amplitúdó, az m pedig a hiszterézis görbe egy-egy szakaszát leíró hatványfüggvény kitevője [8].

Használatos még az Ostergren alkotta összefüggés [9], az egy ciklusban felhalmozott energia leírására.

E munkát a tönkremeneteli ciklusszámmal szorozva, a tönkremenetelig befektetett képlékeny alakváltozási munka meghatározható.

A számítástechnika fejlődésével és az anyagvizsgálat területén való alkalmazásával lehetőség adódott a hiszterézis görbék digitális formában történő letárolására, amelyek felhasználásával a hurkok alatti terület és ezzel a képlékeny alakváltozási munka közvetlenül meghatározhatóvá vált. Ennek következtében az előző összefüggések jelentősége csökken. A nagy mennyiségű mérési adat gyűjtésének korlátai miatt gyakran nem az összes hiszterézis görbét, hanem csak a reprezentatív ciklusok görbéit tárolják le. Ezeket a görbéket azon megfontolás alapján választják ki, hogy a fárasztás kezdetén és végén intenzíven változnak az adatok, ott minden hurok rögzítése indokolt. A későbbiek során a letárolt hurkok száma csökkenthető, például elegendő minden tizedik, majd minden századik mentése.

Az első csoportba sorolt modellekhez (képlékeny alakváltozás amplitúdóra épülő értékelési módszerekhez) képest előnye a képlékeny alakváltozási munkára épülő összefüggéseknek, hogy mérőszámaik fizikailag megalapozottabbak. Ugyanakkor újabb kérdések is felvetődnek. Például, az hogy az összes és a reprezentatív ciklusok hiszterézis görbéi felhasználásával meghatározott képlékeny alakváltozási munkák azonosnak tekinthetők-e, vagy sem. Ugyancsak kérdéses a képlékeny alakváltozási munka, illetve a kisciklusú fárasztás további mérőszámai meghatározásának megbízhatósága. Jelen közleményben e kérdések megválaszolására helyezzük a fő hangsúlyt.

3. A KISCIKLUSÚ FÁRASZTÁS MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK MEGBÍZHATÓSÁGA

Az előző két pontban felvetett kérdések megválaszolása érdekében több vizsgálatssorozatot is végeztünk, amelyek eredményeiről a következőkben számolunk be, bemutatva a mért jellemzők meghatározásának megbízhatóságát, mérési bizonytalanságát.

3.1. VIZSGÁLT ÖTVÖZETEK ÉS JELLEMZŐI

A vizsgált ötvözetek kémiai összetételét, illetve a szabvány által előírt összetétel tartományait három táblázatban foglaltuk össze. Az 1. táblázatban két acél műbizonylat szerinti összetétele látható. A 2. táblázat további két acélminőségénél a szabványban előírt kémiai összetétel határértékei találhatók. A 3. táblázat az AlMg3 jelű alumíniumötvözet műbizonylatban szereplő vegyi összetételét szemlélteti.

Valamennyi vizsgált ötvözetből szakító próbatesteket munkáltunk ki és elvégeztük azok szabványos szakítóvizsgálatait. A vizsgált ötvözetek szakítóvizsgálattal meghatározott jellemzőit a 4. táblázat mutatja.

A bemutatott táblázatok alapján megállapítható, hogy a különböző felhasználási célú acélokon kívül egy nem nemesíthető alumínium ötvözet is található a vizsgált anyagok között. A vizsgálatokba bevont ötvözetek ilyen spektruma lehetővé teszi a mérésekből levont következtetések általánosíthatóságát.

Az acélminőség jele	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cr	Mo
KL7D ⁽¹⁾	0,17	0,24	1,31	0,020	0,036	0,049	–	0,01	0,11	0,02
DX52 ⁽²⁾	≤0,18	0,15-0,20	≤1,50	≤0,030	≤0,035	–	–	≤0,06	≤0,25	–

⁽¹⁾ Ni = 0,08%, Ti = 0,0017%, Cu = 0,26%.

⁽²⁾ Cu ≤ 0,30%.

1. táblázat. A vizsgált acélok kémiai összetétele (tömeg%).

Az acélminőség jele	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
42 CrMo 4	0,38-0,45	0,6-0,9	max. 0,4	max. 0,035	max. 0,035	0,9-1,2	0,15-0,3
16 MnCr 5	0,14-0,19	1,00-1,30	max 0,40	max. 0,035	max. 0,035	0,80-1,10	

2. táblázat. A vizsgált acélok szabvány szerinti kémiai összetétele (tömeg%).

Anyagminőség jele	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Ti	Cr	Zr	Zn
AlMg3 ⁽¹⁾	0,179	0,022	0,310	0,2770	2,950	0,040	0,0430	0,0012	0,044

⁽¹⁾ Pb = 0,009%, Bi = 0,0150%, Be = 0,0018%, Al = 96,1170%.

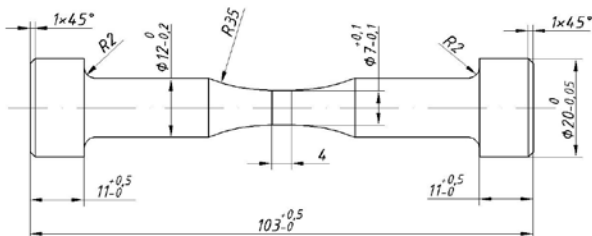
3. táblázat. Az alumíniumötvözet kémiai összetétele (tömeg%).

Anyagminőség jele	Folyáshatár, N/mm ²	Szakítószilárdság, N/mm ²	Szakadási nyúlás, %	Keresztmetszet csökkenés, %
KL7D	392	535	≥19,0	–
DX52	396	543	25,0	71,0
42 CrMo 4	396	633	–	56
16 MnCr 5	372	629	27,3	67
AlMg3	127,7	217,9	27,0	–

4. táblázat. A szakítóvizsgálatok eredményei

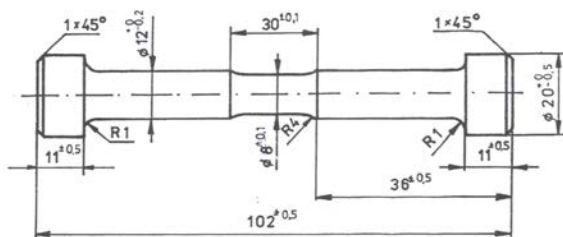
3.2. VIZSGÁLATNÁL ALKALMAZOTT KISCIKLUSÚ FÁRASZTÓ PRÓBATESTEK

A próbatesteket melegen hengerelt féltermékekből munkáltuk ki. A vizsgálatokhoz különböző típusú és méretű próbatesteket használtunk. Az 1. ábrán rövid hengeres szakasszal rendelkező próbatest rajza látható.



1. ábra. Rövid, hengeres szakaszú próbatest.

A 2. ábra az alkalmazott hengeres vizsgálati szakasszal rendelkező próbatestet szemlélteti, amelynél rövid mérőhosszúságú axiális extenzométert lehet alkalmazni.



2. ábra. Hengeres vizsgálati szakaszú próbatest.

3.3. A VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

Az összes és a reprezentatív hiszterézis görbék területéből számított képlékeny alakváltozási munkák azonosságának elemzésére KL 7 D és DX 52 acélból készült próbatesteken végeztünk vizsgálatokat, $\varepsilon_{a1} = 0,01$ és $\varepsilon_{a2} = 0,005$ teljes alakváltozás amplitúdóval, szoba-hőmérsékleten.

A mérések során regisztráltuk az összes hiszterézis görbét és azok területéből meghatároztuk a tönkremenet-

telig befektetett képlékeny alakváltozási munkát, minden próbatesten.

Ugyanezen próbatestek reprezentatív hiszterézis görbéinek (1, 2,...,10, 20,...100, 200,...,1000, 2000,...,N_f-2000, N_f-1000,...,N_f-200, N_f-100,...,N_f-20, N_f-10,...,N_f-2, N_f-1, N_f) felhasználásával is kiszámoltuk a tönkremenetelig befektetett képlékeny alakváltozási munkát. Számítottuk továbbá az egyes mért munkák átlagát, szórását és szórási együtthatóját is. Az eredményekből – terjedelmi korlátok miatt – csak a KL 7 D acélminőség $\varepsilon_{a1} = 0,01$ teljes alakváltozás amplitúdóhoz tartozó adatait mutatjuk be az 5. táblázatban.

A hat-hat próbatesten, kétféle módon meghatározott munkák azonosságát Wilcoxon próbával ellenőriztük. Megállapítottuk, hogy az összes hiszterézis görbe és a reprezentatív hiszterézis görbék felhasználásával meghatározott képlékeny alakváltozási munkák értéke mindkét teljes alakváltozás amplitúdó esetén azonos 95%-os szignifikancia szinten. Arra is fel kellett figyel-nünk, hogy a tönkremeneteli ciklusszámok és a kétféle módon meghatározott munkák adatai nagy szórást mutatnak és a szórási együtthatók is nagyok. Ezért meghatároztuk az egy ciklusba bevitt átlagos munkákat, azok szórását, szórási együtthatóját is (6. táblázat). Az egy ciklusban bevitt átlagos képlékeny alakváltozási munkák szórása és szórási együtthatója lényegesen kisebb, mint az összes ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munkáké.

A DX 52 acélminőség esetén a meghatározott jellemzőkre, azok szórására hasonló megállapításokat tehetünk.

A kisciklusú fárasztás szabályozási és további mérési eredményeinek megbízhatóságát külön kísérlet sorozattal kívántuk meghatározni. Ennek érdekében 16 MnCr 5 acélminőségből készült hengeres próbatesteket fárasztottunk, $\varepsilon_{a1} = 0,005$ névleges nyúlás amplitúdóval. Az öt próbatesten mért jellemzők nagyságát, azok átlagát, szórását és szórási együtthatóját a 7. táblázatban foglaltuk össze.

Próbatest	Teljes alakváltozás amplitúdó	Tönkremeneteli ciklusszám	Reprezentatív ciklusokból számolt munka MJ/m ³	Összes ciklusból számolt munka, MJ/m ³
1	0,01	790	9829	8830
2	0,01	915	11775	10457
3	0,01	775	10443	10054
4	0,01	871	11222	10787
5	0,01	1003	13029	12510
6	0,01	735	9530	9145
Átlag		848	10971	10297
Szórás		100,5	1312	1319
Szórási együttható		11,85	11,96	12,81

5. táblázat. A KL 7 D acél képlékeny alakváltozási munkái.

Próbatest	Teljes alakváltozás amplitúdó	Tönkremeneteli ciklusszám	Reprezentatív ciklusokból számolt egy ciklus munkája, MJ/m ³	Összes ciklusból számolt egy ciklus munkája, MJ/m ³
1	0,01	790	12,44	11,18
2	0,01	915	12,87	11,43
3	0,01	775	13,47	12,97
4	0,01	871	12,88	12,38
5	0,01	1003	12,99	12,47
6	0,01	735	12,97	12,42
Átlag		848	12,94	12,14
Szórás		100,5	0,33	0,6869
Szórási együttható		11,85	2,55	5,66

6. táblázat. A KL 7 D acélminőség egy ciklusba bevitt képlékeny alakváltozási munkái.

Próbatest	Teljes alakváltozás amplitúdó	Képlékeny alakváltozás amplitúdó,	Tönkremeneteli ciklusszám	Feszültség amplitúdó, N/mm ²	Reprezentatív ciklusokból számolt munka, MJ/m ³	Egy ciklusba bevitt munka, MJ/m ³
1	0,005001	0,002887	2151	435,6	8474	3,940
2	0,005064	0,002946	2252	436,2	8492	3,771
3	0,005075	0,003016	2450	424,2	9041	3,690
4	0,005130	0,003039	2920	430,8	11177	3,828
5	0,005089	0,002990	2978	432,4	11407	3,830
Átlag	0,005072	0,002976	2550	431,8	9718	3,812
Szórás	0,000042	0,000054	340	4,31	1303	0,082
Szórási együttható, %	0,823440	1,813504	13	0,998	13	2,148

7. táblázat. A 16 MnCr 5 acélminőségen mért fáradási jellemzők.

A képlékeny alakváltozási munkák azonosságának vizsgálatára korábban már bemutatott KL 7 D acélminőségen végzett kisciklusú fárasztóvizsgálatok adataiból kigyűjtöttük a tönkremeneteli ciklusszámokat és a feszültség amplitúdók nagyságát is. Meghatároztuk azok szórását és szórási együtthatóját (8. táblázat). A vizsgálatokat két különböző terhelési függvénnyel (szinusz, háromszög), két teljes alakváltozás amplitúdóra vezérelve végeztük.

Az utolsó két mérési sorozat bemutatott eredményei alapján megállapítható, hogy a nyúlás amplitúdók és a feszültség amplitúdók relatív szórása kicsi, a tönkremeneteli ciklusszámoké pedig viszonylag nagy érték.

A közlemény megállapításait a további, terjedelmi korlátok miatt be nem mutatott, eredményekre is figyelemmel fogalmaztuk meg.

Terhelési függvény alakja	Teljes nyúlás amplitúdó	Képlékeny nyúlás amplitúdó	Tönkremeneteli ciklusszám,			Feszültség amplitúdó, N/mm ²		
			átlag	szórás	szórási együttható, %	átlag	szórás	szórási együttható, %
szinusz	0,01	0,00790	716	54,75	7,65	440	2,05	0,47
háromszög	0,01	0,00789	813	89,65	11,03	444	1,00	0,23
szinusz	0,05	0,00323	3592	84	2,34	371	2,55	0,69
háromszög	0,05	0,00323	3898	367	9,42	372	1,30	0,35

8. táblázat. A KL 7 D acélminőségen mért fáradási jellemzők.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kisciklusú fárasztóvizsgálatok mérőszámainak megbízhatóságára végzett célirányos mérések eredményei alapján a következő főbb megállapítások fogalmazhatók meg.

1. Az összes hiszterézis görbe és a reprezentatív hiszterézis görbék felhasználásával meghatározott képlékeny alakváltozási munkák értéke 95%-os szignifikancia szinten azonos.
2. A különböző minőségű acélokon mért, tönkremenetelig befektetett összes képlékeny alakváltozási munkák relatív szórása 7% és 16% között változott, ami megfelel más, az anyagvizsgálatban alkalmazott munka jellegű mérőszámok hasonló értékeinek.
3. Az egy ciklusban felhalmozott átlagos képlékeny alakváltozási munkák relatív szórása 2% és 7% közötti, tehát lényegesen kisebb, mint az összes munkára jellemző érték.
4. Az összes képlékeny alakváltozási munkák meghatározási bizonytalansága nagy valószínűséggel azért nagyobb, mint az egy ciklusba bevitt képlékeny alakváltozási munkáké, mert a tönkremeneteli ciklusszámok jelentős szórást mutatnak.
5. A tönkremeneteli ciklusszámok szórási együtthatója viszonylag nagy, 8-15% között változik, de elmarad a nagyciklusú fárasztásnál tapasztalt értékektől.
6. A vezérelt teljes alakváltozás amplitúdó nagyságát a vizsgálatok alkalmával a szabvány által előírt 1%-nál pontosabban tartotta a berendezés. A képlékeny nyúlás amplitúdó szórása kismértékben meghaladta a teljes alakváltozás amplitúdóét, ami érthető is, ha figyelembe vesszük, hogy ez egy számított mennyiség és tartalmazza a feszültség amplitúdó mérésének bizonytalanságát is.
7. A feszültség amplitúdók szórási együtthatója kisebb, mint az anyagvizsgálat által meghatározott más feszültség jellegű mérőszámoké (folyáshatár, szakítószilárdság).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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 Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOM

- [1] Ispytanija pri malociklovom nagruzenii. Tekhnicheskije materialy po standarizacii, Moskva, 1980.
- [2] ASTM E606 / E606-12: Standard Test Method for Strin-Contrilled Fatigue Testing.
- [3] Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből. Szerk.: Lukács, J. Miskolci Egyetem, Miskolc, 2012.
- [4] Dobosy, Á.: Hegesztett kötések kisciklusú fárasztóvizsgálata. BSc szakdolgozat, témavezető: Nagy, Gy., 2011.
- [5] Czoboly, E.; Ginsztler, J.; Havas, I.: Ismeretek a kisciklusú és a termikus fáradásról. Gép, 1984/7. p.241-253.
- [6] Nagy, Gy.: A próbatest alakjának hatása a törés helyére kisciklusú fárasztáskor. Kandidátusi értekezés, Miskolc, 1988.
- [7] Bakos, T., Nagy, Gy.: The characteristics of low cycle fatigue and their possible development. microCAD 2004. International Scientific Conference, 18-19 March 2004. Section C.: Material Science, Miskolci Egyetem Innovációs és Technológiai Transzfer Centrum, Miskolc, 2004. p. 1-5.
- [8] Radhakrishnan, V. M.: Damage Accumulation and Fracture Life in High-Temperature Low-Cycle Fatigue. ASTM STP 770, ASTM 135-152.
- [9] Klesnil, M., Lukas, P.: Fatigue of Metallic Materials. Academia, Prague, 1980.

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. Félempirikus 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 félempirikus, 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 mérhetőség 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

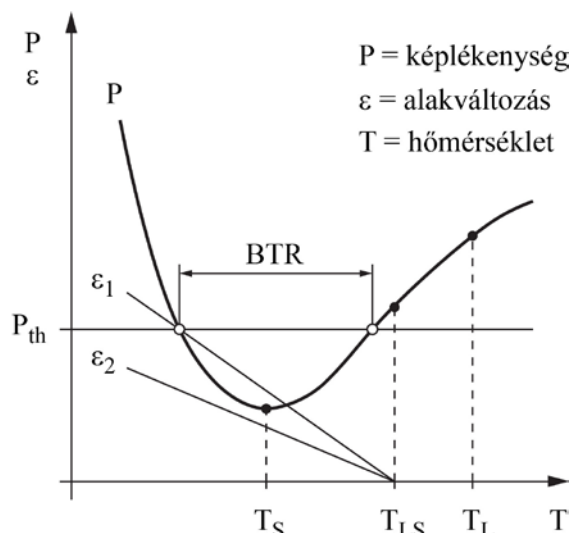
relevánsan megközelítő geometriai (térfogati) léptékben.

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

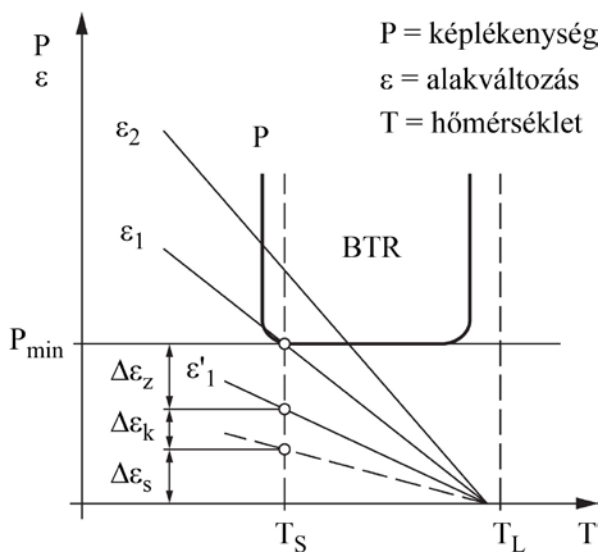
Melegrepedések a hegesztési folyamat során, magas hőmérsékleten keletkezhetnek. A varratfémbe képződött melegrepedések a kristályosodási repedések, a varrat mellett a varrat-alapanyag átmeneténél, közvetlenül a beolvadás vonalán vagy az alapanyagban létrejövő melegrepedések az újraömlési repedések [2, 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 ($\varepsilon_1 > P$), akkor repedés keletkezik, ennél kisebb alakváltozás esetén azonban nem ($\varepsilon_2 < P$). 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_2) esetek között.

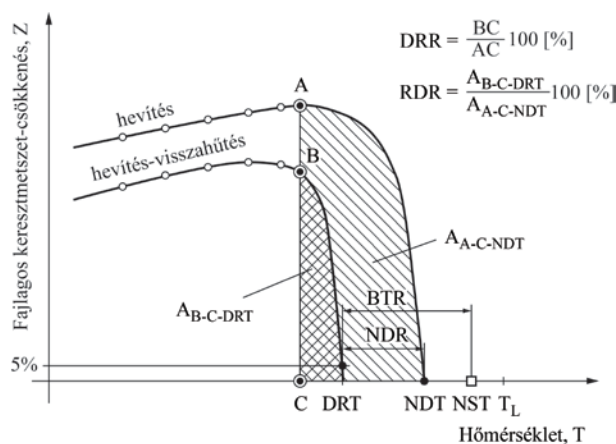


3. ábra. Alakváltozások a melegrepedések keletkezésének alakváltozási elméletében [14].

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 melegsakító, 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*);
- NDT : 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 acélokon, 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 ($1-2$ K/s) hevítési sebességgel; másrészt a berendezésnek biztosítania kell a minimálisan előfeszített állapotot, aminek állandó értéken tartása, a hőtágulás miatt komoly szabályozástechnikai probléma. Az olvadásponthoz közeli 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.

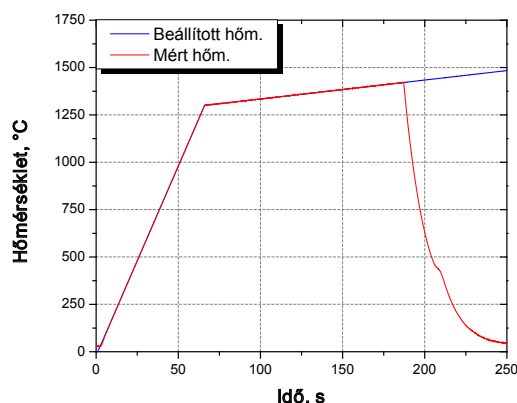
A vizsgálathoz használt sima, hengeres próbatestek átmérője mindegyik anyagminőség esetében 6 mm , hossza 80 mm , a vizsgálati hossz pedig 25 mm volt. A vizsgálat közbeni előfeszítés megválasztása során figyelembe kell venni azt, hogy a terhelésnek minél kisebbnek kell lennie, ám a túl kis előterhelés a vizsgálat reprodukálhatóságát rontja, a meghatározott NST érték bizonytalanságát pedig növeli. Tekintettel ezekre és a próbatest 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)
	$T_x, ^\circ\text{C}$	$v_{hev}, ^\circ\text{C/s}$	$v_{hev}, ^\circ\text{C/s}$
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 paraméterei.

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, $6S-BM-NST-10$ próbatest).

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 próbatest elszakadását, a hozzá tartozó hőmérséklet a NST . A 2. táblázat bemutatja az S690QL jelű acélból készült próbatesteken elvégzett NST vizsgálatok eredményeit, ugyancsak példaként.

A próbatest jele	$NST, ^\circ\text{C}$
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 próbatesteken meghatározott NST hőmérsékletek.

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

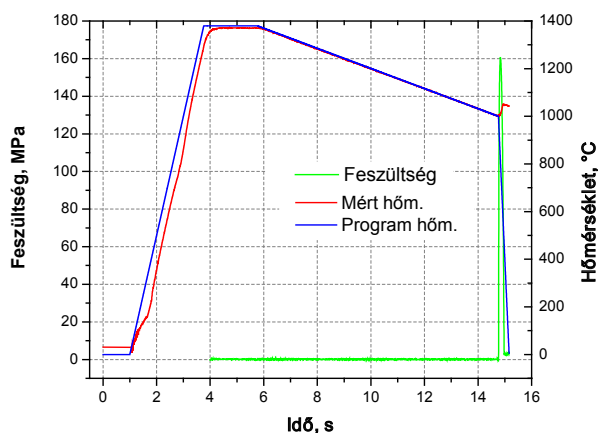
Anyagminőség	A próbatestek száma	Átlag, $^\circ\text{C}$	Szórás, $^\circ\text{C}$	Szórási együttható, %
S690QL	9	1421,5	19,15	1,35
S960QL	11	1408,0	30,46	2,16
AlMg3 (5754)	10	602,6	1,81	0,30
6082-T6	10	616,6	7,15	1,16

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

A melegsakító vizsgálatokra (HTT) az S960QL jelű acélból kimunkált próbatesteken, hevítéses, valamint hevítéses-visszahűtéses technikával került sor. A vizsgálatokhoz használt menetes végű, sima, hengeres próbatestek átmérője 10 mm , hossza $116,5\text{ mm}$, 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 $20-30\text{ }^\circ\text{C}$ -kal. Az S960QL jelű anyag esetében a mérések átlagából megállapított NST érték $1408\text{ }^\circ\text{C}$ volt, ezért csúcshőmérsékletnek az $1380\text{ }^\circ\text{C}$ -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 $500\text{ }^\circ\text{C/s}$, a hőtartási idő a csúcshőmérsékleten 2 s , a hűtési sebesség pedig $40\text{ }^\circ\text{C/s}$ 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.



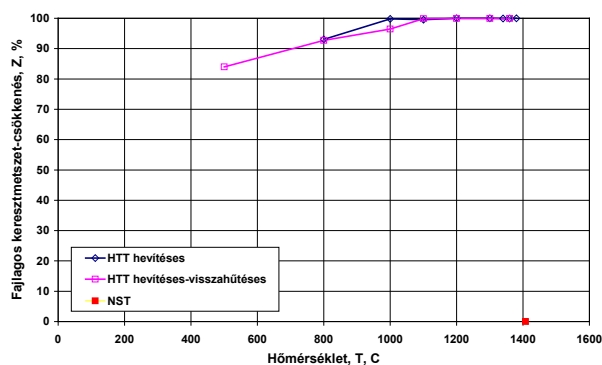
6. ábra. Egy hevítés-visszahűtéses melegsakító vizsgálat hőmérséklet-idő diagramja (S960QL jelű acél, 1300°C/1000°C).

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 $NDT = 1390^\circ\text{C}$, $DRT = 1370^\circ\text{C}$, $BTR = 38^\circ\text{C}$, $NDR = 20^\circ\text{C}$.

$T_{\text{hev}}, ^\circ\text{C}$ vagy $T_{\text{hev}}/T_{\text{hűt}}, ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$	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:

- S960QL 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) meghatározását célzó és melegsakító (HTT) vizsgálatok, valamint irodalmi megfontolások (például [14]) alapján az valószínűsíthető, hogy az S960QL jelű acél melegepedés-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 Werkstoff- 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.

EDZÉSHEZ ALKALMAZOTT HŰTŐKÖZEGEK MINŐSÍTÉSE

QUALIFICATION OF QUENCHING MEDIA

Kerekes Gábor*, Kocsiné Baán Mária**, Felde Imre***

ABSTRACT

The immersion quenching process, what is performed in two main steps viz. austenitization of workpiece and then rapid cooling by quenchant, is used to achieve the adequate strength and toughness in the possible largest part of geometry. The most critical stage of the process is the cooling, what affects the forming microstructure directly. The cooling rate is always changed as a function of temperature of continuously cooled workpiece. The shape of cooling curve, from where i.e. the cooling rate – temperature curve can be calculated depends on the type of cooling media, and parameters (e.g. temperature, agitation rate, concentration, etc.) describing the condition of quenchant as well. In this paper the influence of three parameters on the cooling rate will be shown, what is obtained in the course of examination of aqueous polymer solution.

1. Bevezetés

A bemerítéses edzési eljárás, mint ismeretes a munkadarab ausztenítéséből, valamint az ezt követő lehűtéséből áll, és alapvető célja a kívánt szilárdságú és szívósságú szövet létrehozása, lehetőség szerint a térfogat minél nagyobb hányadában. A hőkezelési folyamat kritikus részművelete az ausztenítésési hőmérsékletről való hűtés, mely mintegy meghatározza a szövetszerkezetet és a mechanikai tulajdonságokat a munkadarab keresztmetszetében. A bemerítéses edzéshez alkalmazott hűtőfolyadékok edzési teljesítménye az alkatrész sajátosságain (alapanyaga, előállapota, geometriája, felületi érdessége, stb.) kívül a közeg hőelvonási vagy hűtési képességének is függvénye. A közeg hőelvonásának karakterisztikáját a közeg típusa, hőmérséklete, áramlási viszonyai, koncentrációja, szennyezettsége határozza meg.

A hűtőközegek minősítése területén kifejtett kutatófejlesztő tevékenység az elmúlt három évtizedben csaknem napjainkig döntően két fő területre összpontosult:

1. Az egyik súlyponti terület az edzőközegek hűtőképességének, vagy hűtési teljesítményének (cooling power) mérésére és értékelésére alkalmas berendezések és módszerek kidolgozása. A hűtési teljesítményt a szakirodalom [1.] a hűtőközeg „hőntani reakció”-jaként (thermal response), azaz az alkatrészből a hűtőközeg által elvont hő mennyiségének jellemzőjeként definiálja.

2. A másik terület a hűtőközegek „edzési teljesítményének” (hardening power) számszerű minősítésére alkalmas eljárások kifejlesztése. Az edzési teljesítmény [1.] a munkadarab „fémntani reakcióját” (metallurgical response) jellemzi, azaz az edző közegnek azt a képességét, mely az adott alapanyagú és geometriájú alkatrész edzés utáni mechanikai tulajdonságait (első sorban keménységét) minősíti.

Fontos megjegyeznünk, hogy a „hűtési teljesítmény” meghatározása csaknem kizárólag a hűtés folyamata során rögzített lehűlési görbe karakterisztikájára koncentrál, annak bizonyos szakaszait, szélső értékeit veszi figyelembe és ezekből az adatokból generál jellemzőket, melyek alapján „erélyességi” (quenching severity) sorrendbe képes rendezni a vizsgált, edzésre alkalmas közegeket és eljárásokat.

Az „edzési teljesítmény” mérőszámai a „hűtési teljesítmény” adataiból indulnak ki és ezen származtatott adatokat az adott hűlési görbe felvételekor lejátszódó hőátadási viszonyok során – tehát például egy polimer adalékos közegben történt edzésekor – az adott próbatesten kialakult anyagtulajdonságokkal együtt jellemzik.

Az alábbiakban a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén a TÁMOP 4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 kódszámú projekt keretében létrehozott új, a hőkezelési technológiát támogató kompetenciáról ejtünk szót.

2. Lehűlési görbék elemzése az ivfSmartQuench berendezéssel

A hűlési görbe elemzés legelterjedtebb módszere az ISO 9950 szabványban előírt eljárás alapul.[2.] A méréshez egy nikkelbázisú ötvözetből készült (Inconel 600) $\varnothing 12.5 \times 60$ mm méretű hengeres próbatestet használnak, melynek a szimmetriatengelyében, a véglaptól 30 mm-re egy NiCr-NiAl típusú termoelem van.

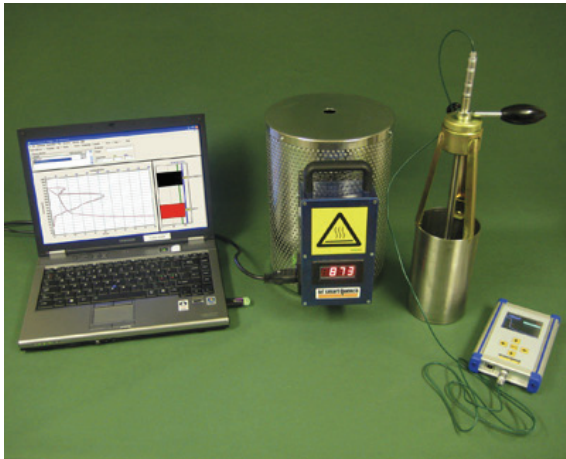
A szabvány pontosan definiálja a mérés körülményeit, úgy, mint, a próbatest felületének előkészítését, a hevítés idejét és atmoszféráját, a termoelem jelének mintavételi frekvenciáját stb. Ugyancsak szigorúan meghatározottak a nyugvó és a mesterségesen áramoltatott közegben való hűlési görbefeelvétel kondíciói, a próbatest helyzete, az edzőfolyadék mennyisége és a kalibrálási eljárás. A próbatestet 850 °C-ról a 2000 ml térfogatú folyadékban hűtik le, miközben a szenzor jelét a teljes lehűlési folyamat

*mérnök tanár

**egyetemi docens

***egyetemi docens, Óbudai Egyetem-NJK

során rögzítik. Az ISO 9950 népszerűsége első sorban a mérések jó reprodukálhatóságának tulajdonítható. További előnye, hogy a próbatestet mobil műszerbe építve ipari környezetben is hatékonyan használható.



1. ábra Az ivfSMartQuench műszer és részei

Az ISO 9950 szabvány alapján működő ivfSmartQuench levezetésű műszer az alábbi részekből áll (1. ábra):

- Hordozható kemence: ebben hevítjük fel a próbatestet
- Próbatest és adatgyűjtő: a lehűtés a lehűlési görbék tárolására alkalmas egység
- Tartály, melyben a vizsgált hűtőközeget tároljuk
- *SQintegra* szoftver: a lehűlési görbék elemzésére, a hőátadási együttható számítására és az edzés során kialakuló szövetelemek és keménység számítására alkalmas program

3. Polimer adalékos hűtőközegek hűtési és edzési teljesítményének mérése

Az alábbiakban a Houghton International PAG típusú, BW jelű polimer adalékos hűtőközeg vizsgálatát mutatjuk be. A lehűlést befolyásoló tényezők közül három paraméter, azaz a közeg hőmérsékletének, koncentrációjának és keringtetési sebességének a hűlési karakterisztikára való együttes hatását teszteljük. A vizsgálatokat 5%, 10% és 20%-os koncentrációjú vizes oldatokban, 0,2, 0,4, 0,6 és 0,8 m/s keverési sebesség és 25, 35 és 50 °C közeghőmérséklet mellett végeztük. Az egyes hűtések során regisztrált lehűlési görbéket a 2. ábra tünteti fel.

Az ISO 9950 szabvány előírásainak megfelelően a vizsgált közeg hűtési, edzési képességére vonatkozóan a lehűlési görbékkel az alábbi értékeket számítottuk ki:

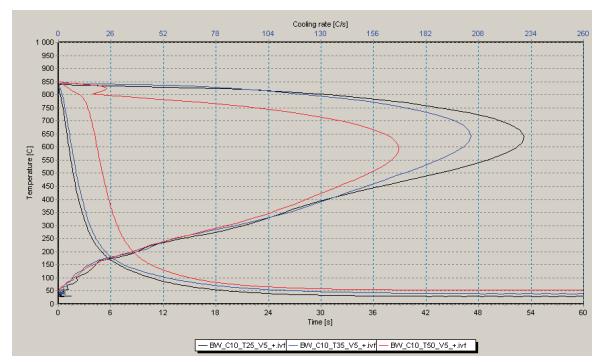
- CR_{max} – a hűlési sebesség maximuma
 - $HP_{Polimer}$ – Az IVF cég által kidolgozott empirikus formula, mely a hűtési erélyességre utal
- $$HP_{Polimer} = 3,54 \cdot CR_f + 12,30 \cdot CR_m - 168$$

ahol

CR_f a hűlési sebesség 550 °C-on

CR_m a hűlési sebesség 325 °C-on

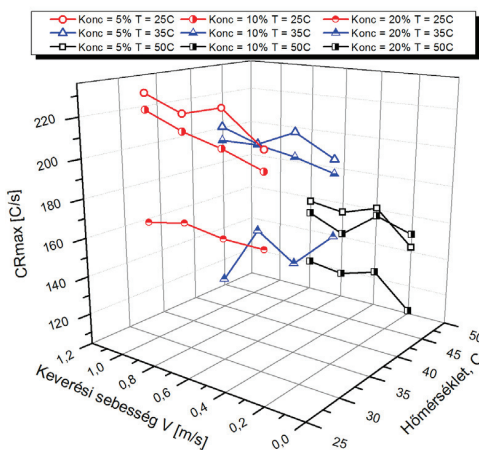
Ahogy az a 2. ábraan egyértelműen látszik, a közeg hőmérséklete jelentősen befolyásolja a hűlési sebesség karakterisztikáját. Minél kisebb ui. a folyadék hőmérséklete, annál nagyobb lesz a maximális hűtési sebesség (CR_{max}). A közeghőmérséklet növelése minden egyes áramoltatási sebesség mellett a maximális lehűlési sebesség csökkenését vonja maga után. Továbbá az is szembeűnő, hogy a 25°C és 35°C-os polimer adalékos oldatok esetén, kis keverési sebesség mellett sem tapasztalható a gőzfázis jelenléte, azaz a lehűlési görbe első szakaszában (0-5s) folyamatosan és intenzíven növekszik a lehűlési sebesség a lehűlési görbe inflexió pontjáig. Ezzel szemben az 50 °C-os közegnél már megfigyelhető gőzfátyol képződésével járó szakasz jelenléte; erre utal a lehűlési sebesség függvényen a lehűlési folyamat kezdeti szakaszában „kialakuló” lokális maximum.



2. ábra 10% koncentrációjú, 0,4 m/s sebesség mellett 25, 35 és 50 °C hőmérsékletű hűtőközegekben felvett lehűlési görbék

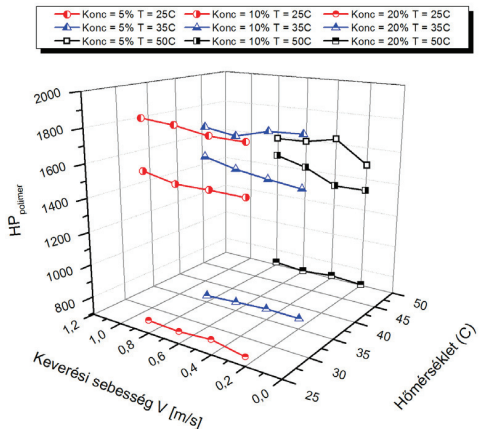
A mért hűlési görbék CR_{max} értékei a 3. ábrán figyelhetőek meg rendre a koncentráció, a keverési sebesség és a közeg hőmérsékletének függvényében. Az ábrán a maximális lehűlési sebesség értékeit a különböző koncentráció (3db), közeghőmérséklet (3db) és keverési sebesség (4db) esetében összesen 36 pont szemlélteti.

Az ábra tanúsága szerint a legnagyobb lehűlési sebesség a legkisebb hőmérsékletű (25 °C) és az 5 és 10% adalékot tartalmazó hűtőközegekben alakult ki. A legnagyobb hűlési sebesség értéke 254 °C/s-ra adódott 0,6 m/s keringtetési sebesség mellett. Ennél kisebb (190-230 °C/s) CR_{max} érhető el a 35 °C-os oldatban, amelynek koncentrációja ugyancsak 5 és 10%-os volt. Amennyiben a közeg hőmérséklete 50 °C-os vagy a hűtőközeg 20% polimeradalékot tartalmaz, akkor a legnagyobb lehűlési sebesség értéke 150-200 °C/s nagyságú. A keverési sebesség hatása az egyes koncentrációk és hőmérsékletek alkalmazása esetén egyértelműen azt bizonyítja, hogy a közegmozgatás a hűlési sebesség növeléséhez járul hozzá. Ugyanakkor az is kitűnik a mérési adatokból, hogy az egyes esetekben (pl. 25 °C hőmérsékletű 10%-os oldatnál, vagy az 50 °C hőmérsékletű 10%-os oldatnál) a keverési sebesség növelésének nincs szignifikáns hatása a CR_{max} értékére.



3. ábra A CR_{max} értéke a keverési sebesség, hőmérséklet és koncentráció függvényében

Ebből a megfigyelésből az is következik, hogy a keverési sebességet egy bizonyos mértéken túl felesleges, értelmetlen alkalmazni, mert a lehűlés sebességére gyakorolt hatása nem jelentős. Továbbá az is szembetűnő, hogy a kis koncentráció esetén (azonos hőmérséklet és mozgatási sebesség mellett) a CR_{max} értékei között nincs nagy eltérés. Jelentős különbség mutatkozik azonban kis koncentrációjú és a nagyobb, azaz 20%-os adalék alkalmazásánál kialakuló lehűlési sebesség között. A nagyobb mennyiségű adalék használatával tehát nagymértékben változtatható, „rontható” vagy „degradálható” a lehűlési sebesség.



4. ábra A CR_{max} értéke a keverési sebesség, hőmérséklet és koncentráció függvényében

A lehűlési görbékéből származtatott, polimeradalékos közegekre vonatkozó HP értékek alakulását a 4. ábraán követhetjük nyomon. A legnagyobb HP_{polimer} értékek – a CR_{max}-ra vonatkozó elemzésénél tapasztaltakhoz hasonlóan – a legkisebb hőmérsékletű és kis adalékmenyiséget tartalmazó folyadék alkalmazásánál adódtak. Az 5 és 10%-os koncentrációjú közegekben jellemzően nagyobb a

számított HP_{polimer} szám, mint a 20%-os oldatokban. Továbbá érdekes, hogy amíg a lehűlési sebesség szélső értékei az 50 °C-os közeg esetében – annak a vizsgált összes koncentrációjú módoszataira vonatkozóan – a legalacsonyabb tartományban helyezkedtek el, a HP_{polimer} értékek kis koncentrációnál a magasabb értéktartományba estek. A koncentrációnak a HP_{polimer} számra gyakorolt hatása egyértelműen leolvasható a 4. ábraáról, ahol is a legkisebb értékek a 20%-os koncentrációjú hűtőközeghez köthetőek, s a kisebb koncentrációkhoz rendre nagyobb HP_{polimer} érték társul. A hőmérséklet és a HP_{polimer} szám kapcsolata között szintén fordított arányosság figyelhető meg. A keverési sebesség hatása ugyancsak szembetűnően detektálható a diagramok adatait elemezve, a közeg keringtetésének fokozása a HP_{polimer} értékek növelésével jár együtt.

A polimer adalék alkalmazásának előnye, mint ismeretes, elsősorban abban mutatkozik meg, hogy az egyes technológiai paraméterek bizonyos együttállásai esetén más és más lehűlési karakterisztika érhető el. Más szóval, az adalék mennyiségének, a közeg hőmérsékletének és a keverési sebességnek pontos beállításával különböző hűtési eljárások megvalósítására adódik lehetőségünk. A hűtőközeg karakterisztikájának „hangolásának” azonban gátat szabhat a technikai vagy gazdasági korlát. Tehát csak bizonyos keretek között lehet egy közeg hőmérsékletét beállítani, ha nincs megfelelő hűtési eszközökkel felszerelve a hűtőkád, akkor a folyadék temperálásával egy bizonyos érték alá nem lehet hűteni a közeget. A hűtőkádban kialakuló keringtetési sebesség mind a beépített folyadékforgató berendezés, mind pedig a benne lévő tárgyak, azok elhelyezkedésének függvénye. Egy adalékos hűtőközeg koncentrációját általában igen költséges megváltoztatni, egyrészt amiatt, mert maga a polimer adalék drága, másrészt az elhasznált, veszélyes anyagnak számító és speciális módon kell megsemmisíteni (amely művelet igen költséges).

Az imént röviden bemutatott okok miatt is különösen érdekes a 4. ábraán látható 1600-1900 HP_{polimer} érték tartomány. A vizsgálatokból adódó gyakorlati fontosságú felismerés, hogy ugyanolyan (vagy kis mértékben eltérő) HP_{polimer} értékek különböző koncentráció, keverési sebesség és hőmérséklet együttállás esetén is előállítható, elérhető.

Azonos értékű HP_{polimer} szám (például, 1600) elérése a hűtőközeg állapotát befolyásoló paraméterek eltérő kombinációival is megvalósítható. A BW edzőfolyadékot alkalmazva például 1800 HP polimer értékhez az 5-10 % adalékkoncentrációhoz a 25-50 °C közegehőmérséklet is választhatjuk. A becslő adatok arra utalnak, hogy a paraméter-kombinációk a hűtési teljesítmény szempontjából „ekvivalensek”. Hasonló jelenség a hőkezelési gyakorlatban is ismert, edzett acélok megeresztésekor az idő és hőmérséklet hatását egyenértékű paraméterekkel szokás jellemezni (pl. Hollomon-Jaffe paraméter alkalmazásával).

4. Összefoglalás

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén kialakított, a hűtőközegek kvantitatív elemzésére alkalmas kompetenciát mutattuk be röviden. Az ivfSmartQuench berendezés használatával az acélok bemeztési edzéséhez használt közegek hűtési erélyességének, illetve a hőátadási során kialakuló termikus peremfeltételek analizésére nyílik lehetőség. A TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt keretében életre hívott kompetencia bevezetésére, a hazai iparban járatos hőkezelési eljárások támogatására a 2014. év folyamán kerül sor.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka 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.

5. Irodalomjegyzék

- [1.] *Quenching Media. Determination of Quenching Severity of an Industrial Facility*, Draft international standard submitted by Association Technique de Traitement Thermique France, to the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (IFHT, 1988)
- [2.] *Industrial Quenching Oils - Determination of Cooling Characteristics - Laboratory Test Method*, Draft international standard ISO/DIS 9950, International Organization for Standardization (submitted 1988), Laboratory Test for Assessing the Cooling Characteristics of Industrial Quenching Media, Wolfson Heat Treatment Centre, Birmingham, England, 1982

PLAZMANITRIDÁLÁS A MISKOLCI EGYETEM ANYAGSZERKEZETTANI ÉS ANYAGTECHNOLÓGIAI INTÉZETÉBEN

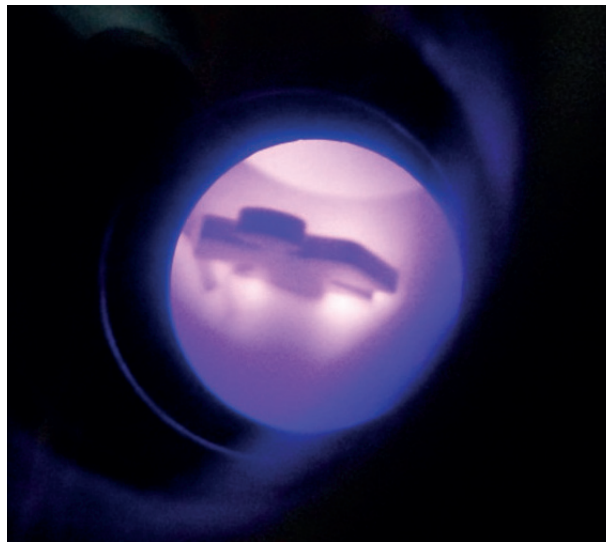
Az általánosabban alkalmazott tradicionális felületmódosító eljárások (indukciós edzés és betétedzés) mellett egyre gyakrabban alkalmazzák az alacsonyabb hőmérsékletű, ebből következően kisebb torzulást előidéző, gazdaságosabb gáznitridálást és a hazánkban még újszerűnek számító, a termokémiai felületmódosító technológiák legjelentősebb innovációjának tekintett plazmanitridálást. A plazmatechnológiák fokozottabb

elterjedését mindenekelőtt az energia-megtakarítás, a viszonylag rövid hőkezelési idő, a minimális gázfelhasználás és a környezetvédelem szempontjai indokolják. A felületi réteg kialakulása a technológiai paraméterek szabályozásával nagyon precízen befolyásolható, nemcsak a rétegmélység, hanem a réteg szerkezetének kialakítása, szabályozása vonatkozásában is. A kialakult felületi réteg közvetlenül megnövelheti a gépalkatrészek élettartamát, de akár fontos szerepet játszhat szerszámanyagok duplex felületkezelésében is.

A Miskolci Egyetem Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében idén telepített plazmanitridáló berendezésben maximálisan 400 mm átmérőjű és 1800 mm hosszúságú alkatrész kezelhető, de ezen térfogatrészen belül egyszerre több betétanyag plazmanitridálása is elvégezhető.



A plazmanitridáló berendezés a kiszolgáló sínrendszerrel



Ionizált plazma a hőkezelt darab körül

LEMEZANYAGOK ALAKÍTHATÓSÁGA, AZ ALAKÍTÁSI HATÁRDIAGRAMOK MEGHATÁROZÁSÁNAK VIZSGÁLATA

FORMING THE SHEET METALS, INVESTIGATING THE DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT DIAGRAMS

Tisza Miklós *, Kovács Péter Zoltán **

Abstract

Car manufacturing is one of the main target fields of sheet metal forming: thus sheet metal forming is exposed to the same challenges as the automotive industry. The continuously increasing demand on lower consumption and lower CO₂ emission means the highest challenges on materials developments besides design and construction. As a general requirement, the weight reduction and light weight construction principles should be mentioned together with the increased safety prescriptions which require the application of high strength steels. However, the application of high strength steels often leads to formability problems. Forming Limit Diagrams (FLD) are the most appropriate tools to characterize the formability of sheet metals. Theoretical and experimental investigations of forming limit diagrams are in the forefront of today's research activities.

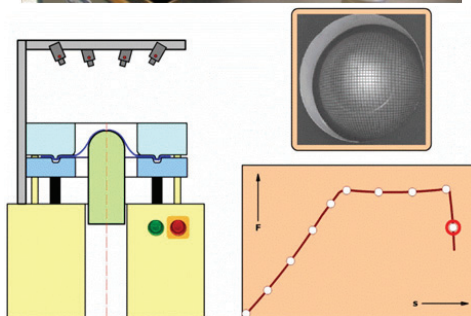
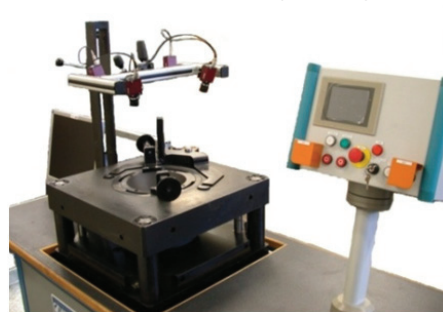
Kivonat

A lemezalakítás, amelynek az egyik legnagyobb alkalmazója az autóipar, napjainkban ugyanazokkal a kihívásokkal néz szembe, mint az autóipar egésze. Ezek a folyamatosan fokozódó követelmények egyre kisebb fogyasztású, kisebb káros anyag (CO₂) kibocsátású gépjárművek fejlesztését igénylik, amely a konstrukciós fejlesztések mellett a legnagyobb kihívást az anyagfejlesztésekkel szemben jelenti. Általános követelményként fogalmazódik meg a jelentős tömegcsökkentés, amely könnyű szerkezetes konstrukciós megoldásokat, és ehhez a fokozott biztonsági előírások betartásával együtt pedig egyre nagyobb szilárdságú anyagok alkalmazását igényli. A tömegcsökkentési követelmény szempontjából kívánatos, növelt szilárdságú anyagok alkalmazása azonban gyakran alakíthatósági problémákat vet fel. Az alakíthatóság mai, korszerű jellemzésére szolgálnak az alakíthatósági határdiagramok (FLD). Napjainkban az alakítási határdiagramok (Forming Limit Diagram - FLD) elméleti elemzése és kísérleti vizsgálata a lemezalakítás, a lemezek alakíthatóságának egyik központi témája.

Bevezetés

A járműipari lemezfeldolgozás számára, a számítógéppel segített technológia- és szerszámtervezéshez a feldolgozandó lemezanyagok alakíthatóságát egyre pontosabban jellemző, és a végeselemes számítási módszerekben közvetlenül alkalmazható, számszerűsített formában kell szolgáltatni. A hazai lemezfeldolgozó ipar fokozódó igényeinek megfelelően, a lemezek alakíthatóságával évek óta foglalkozik tanszékünk. Jelen tanulmányban az alakíthatósági vizsgálatokkal, az alakítási határdiagramok meghatározásával kapcsolatos vizsgálati lehetőségeinket mutatjuk be.

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológia Tanszékén hazai és nemzetközi kutatási projektek támogatásával egy integrált lemezalakíthatósági vizsgáló rendszert valósítottunk meg (1. ábra), amely egy elektro-hidraulikus, számítógép vezérlésű lemezvizsgáló gépet és egy automatizált optikai alakváltozás-mérő rendszert foglal magába.

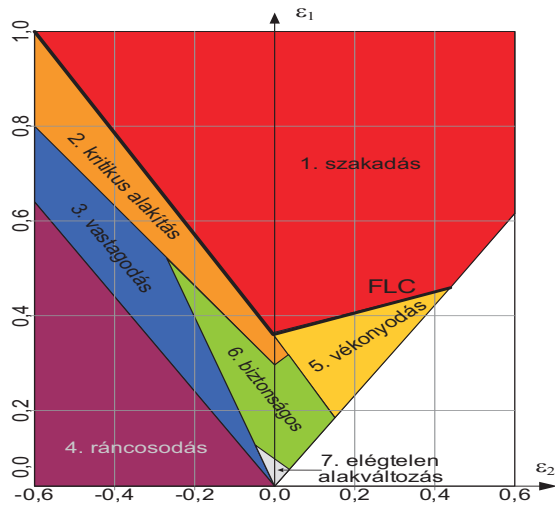


1. ábra. Az univerzális lemezvizsgáló berendezés az optikai mérőrendszerrel

* egyetemi tanár, tanszékvezető;

** egyetemi adjunktus

Az alakítási határdiagramok (2. ábra) jelentős szerepet játszanak a virtuális lemezalakításban is. Segítségükkel nem csak a sikeres, vagy sikertelen alakítás kérdése vizsgálható, hanem további hasznos információkat nyerhetünk az alakítási folyamat egyre komplexebb és körültekintőbb megismerésére.



2. ábra. Hagyományos lemezalakításra érvényes alakíthatósági határdiagramja jellegzetes tartományokkal

1. Az alakítási határdiagramokat befolyásoló tényezők elemzése

Az alakítási határdiagramok kérdésköre igen összetett: meghatározásuknál számos olyan tényezővel kell számolnunk, amelyek jelentős hatást gyakorolnak az alakítási határértékre és ez által a meghatározott alakítási határdiagramok megbízhatóságára, gyakorlati alkalmazhatóságára. A befolyásoló tényezőket számos szempont szerint osztályozhatjuk. Az alábbiakban az alakítási határdiagramokat befolyásoló legfontosabb tényezőket foglaljuk össze:

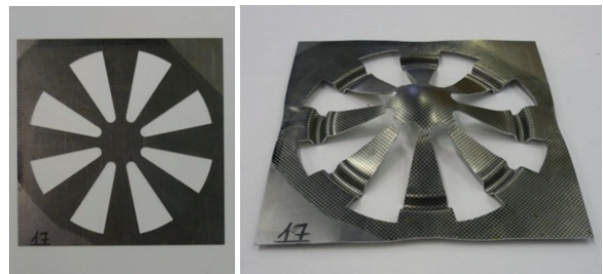
az alakváltozási történet, a vizsgálatnál alkalmazott alakváltozási út (deformáció-történet),

- az anyagminőség, az anyagjellemzők, például az anizotrópia tényező, a keményedési kitévő és a sebességkitévő, az öregedés, a hengerlési irány és az anyagjellemzők szórásának hatása,
- a lemezvastagság,
- a próbatest alakjának és méreteinek hatása,
- a vizsgálati körülmények (pl. az alkalmazott hálózás típusa, mérete, pontossága, a háló alakváltozás mérésének módja, pontossága, a súrlódási, kenési feltételek, a hőmérséklet, a vizsgálati eljárás típusának hatása.)

A befolyásoló paraméterek közül a hengerlési irányok és az anizotrópia hatását vizsgáltuk meg elsősorban, annak érdekében, hogy ne kelljen minden irányban meghatározni adott anyagra az alakítási határgörbét (melyik irány lesz a legkedvezőtlenebb az alakíthatóság szempontjából.), így időt és munkát megtakarítva.

2. Csillag próbatest

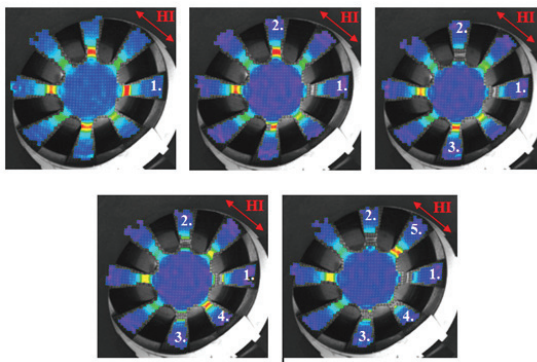
Egy vizsgálatsorozattal azt kívántuk tanulmányozni, hogy lehetséges-e egy próbatesten egy vizsgálattal ugyanazt az alakváltozási útvonalat többször is megvalósítani, ezáltal is növelve a kísérleti eredmények megbízhatóságát. Ennek érdekében terveztünk meg és végeztünk kísérleteket a következő ábrán látható, alakja miatt „csillag” próbatestnek nevezett kialakítással.



3. ábra. Csillag próbatest kialakítás

Az ábrán látható próbatest kialakítás előnye, hogy egy vizsgálat során ugyanazt az alakváltozási útvonalat többször is megvalósítható, hátránya ugyanakkor, hogy a hídszélességek többszöri kialakításának korlátja miatt csak a negatív ϵ_2 tartományban használható. Minél több lábát alakítunk ki, annál többet tudunk elszakítani. Természetesen a sok láb a hídszélesség csökkenéséhez vezet. Kísérleti vizsgálatainknál 8-lábú próbatestet vizsgáltunk, amelynél a hídszélességek közül a hengerlési iránnyal megegyezően 2 hídszélességet, a hengerlési irányra merőlegesen 2 hídszélességet és a hengerlési iránnyal 45°-osan 4 hídszélességet valósítottunk meg. Egy vizsgálat során 5 lábnál tudtuk szakadásig végezni a vizsgálatot, amely tehát azt jelenti, hogy azonos – de legalább is közel azonos alakváltozási utat, egy vizsgálattal, 5 alkalommal tudtunk megvalósítani. Egy ilyen kísérletsorozat eredményeit mutatja a 4. ábra, $t = 1$ mm lemezvastagságú, DC05 anyagminőségre.

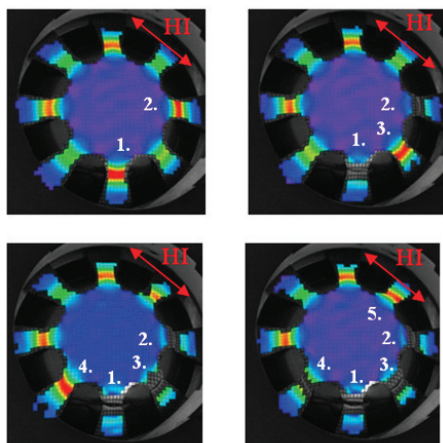
Anyagminőség: DC05, lemezvastagság: 1 mm,
rádiusz: 5 mm, hídszélesség: ~10 mm



4. ábra. Csillag formájú (8 lábú) próbatest alakításának szakadási sorrendje 5 mm-es rádiusznál, 10 mm-es hídszélességnél; HI: Hengerlési irány

Ugyanazokkal a paraméterekkel, csak a rádiusz értékét megváltoztatva – ezáltal a hídszélességet kis mértékben növelve – az alábbi szakadási sorrend alakult ki (5. ábra).

Anyagminőség: DC05, lemezvastagság: 1 mm, rádiusz: 7 mm, hídszélesség: ~14 mm



5. ábra. Csillag formájú (8 lábú) próbatest alakításának szakadási sorrendje 7 mm-es rádiusznál, 14 mm-es hídszélességnél; HI: Hengerlési irány

Mindkét esetben a hengerlési irányra 45°-os szögben álló lábak szakadtak el először. Első változatnál a hengerlési irányra 45°-os szögben álló négy láb közül három, míg a második változatnál négyből kettő szakadt el.

Az $r = 5$ mm és $r = 7$ mm-es csillag formájú próbatesteken az egyes lábak elszakításával többször is meghatározott azonos útvonalakon kapott FLC pontokat az 1. táblázatban foglaltuk össze, a kapott alakváltozások számszerű összehasonlítása érdekében.

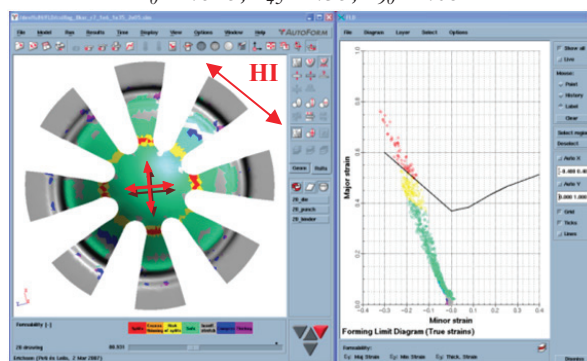
1. táblázat. Azonos alakítási útvonalakkal elért FLC pontok a csillag próbatestnél

	$r = 5$ mm		$r = 7$ mm	
szakadás helye	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2
1.	0,53	-0,15	0,54	-0,16
2.	0,50	-0,15	0,54	-0,16
3.	0,52	-0,16	0,54	-0,20
4.	0,54	-0,21	0,54	-0,21
5.	0,55	-0,22	0,50	-0,17

Ennek a próbatest kialakításnak nagy előnye, hogy lehetőségünk van tanulmányozni a hengerlési irányok hatását is. A hengerlési irányok megfigyeléséhez a szakadások közül csak az első pár szakadás tekinthető mérvadónak, a továbbiakra már ezek lesznek hatással. A hengerlési irányoknak megfelelően kialakított lábak szakadásának típusából és sorrendjéből megállapítható, hogy melyik irány lesz a legkedvezőtlenebb az alakíthatóság szempontjából. Ennek ismeretében nem kell minden irányban meghatározni adott anyagra az alakítási határgörbét, hanem elegendő a legkedvezőtlenebb irányban.

A DC05 lemez szakítóvizsgálat eredményeiből meghatározott anizotrópia tényezőket felhasználva modellezéssel is meghatároztuk a csillag próbatest szakadásának várható helyeit (6. ábra).

Anyagminőség: DC05, HI: Hengerlési irány,
 $r_0=1.625$, $r_{45}=1.35$, $r_{90}=2.05$



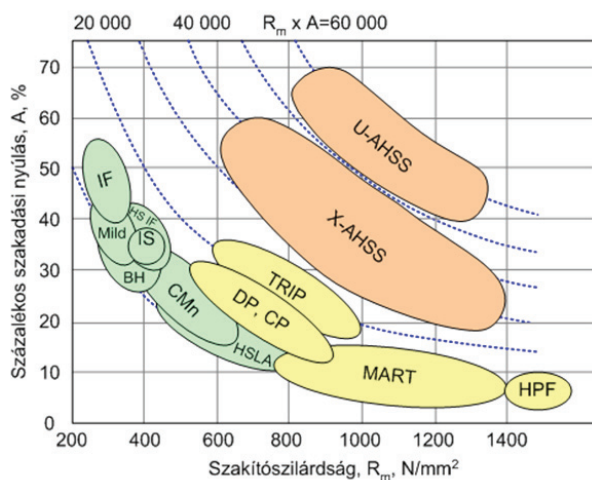
6. ábra. DC05 anyagminőségből készült csillag próbatest modellezési eredményei

A modellezés eredménye jó egyezést mutatott a kísérleti darabokon tapasztaltakkal.

Az itt most teljes körűen nem részletezett modellezési és kísérleti eredményekből megállapítottuk, hogy az anizotrópia tényezők irányok szerinti változása hatással van a lábak szakadásának sorrendjére. Ennek alapján kijelenthető, hogy a csillag formájú próbatest alkalmas a legkedvezőtlenebb irány meghatározására.

3. Vizsgálati anyagminőségek

Az anyagminőség alakíthatóságra gyakorolt hatását elemezve általában érvényes, hogy a növekvő szilárdsági jellemzők csökkentik az alakíthatóságot. Ezt a hatást jól szemlélteti a 6. ábra, amelyen a szakítószilárdság (R_m) és a fajlagos nyúlás (A_{80}) kapcsolata látható az utóbbi évtizedek acélfejlesztési eredményeinek bemutatásával.



7. ábra. Az anyagminőség alakíthatóságra gyakorolt hatása

A projekt keretén belül vizsgálni kívánt anyagminőségek: DC01, DC04, DC05, DD14, Nagyszilárdságú acélok: DP600, DP800, DP1000, AHSS acélok: TRIP acélok, TWIP acélok, Melegalakításra kifejlesztett acélok: 22MnB5, Al és ötvözetek közül: AlMg3

Összefoglalás

A cikk lemezanyagok alakíthatóságának egy speciális területével, az alakítási határ diagramok elméleti és kísérleti elemzésével foglalkozik. Az alakítási határdiagramok napjainkban a lemez alapanyagok alakíthatóságának értékelésében a legáltalánosabban alkalmazott, legalkalmasabb minősítő eszköznek tekinthetők.

Köszönetnyilvánítás

A projektben 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 Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] **Tisza M., Kovács, P. .Z:**Forming Limit Curves – a practical guide to AutoGrid, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék, 2006. pp. 1-55.
- [2] **Banabic, D., Pöhlndt, K., Bunge, H-J., Tekkaya, A. E.:**Formability of Metallic Materials, Springer, Berlin, 2000. pp. 1-334.
- [3] **Tisza, M., Gál, G., Kiss, A., Sárvári, J.:** Metal Forming (in Hungarian), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest. 1998. pp. 1-364.
- [4] **Ziaja György:** Az alakítási határállapotok kutatása (1996/3) Anyagvizsgálók Lapja - Képlékenységi és alakíthatósági anyagjellemzők meghatározása
- [5] **Ziaja György:** Alakítási folyamatok határállapotai, akadémiai doktori értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék, 1994
- [6] **Kovács P. Z., Tisza M.:** Lemez alakíthatósági vizsgálatok optikai alakváltozás méréssel. Gégyártás, 48.k., 3. sz. pp. 109-113.
- [7] **Tóth J.:** Hidegen hengerelt lemezek korszerű alakíthatósági jellemzőinek (r , n és T) vizsgálata. Bányászati és Kohászati Lapok 109. évf. 4. sz. 1976. p. 145-148.
- [8] **Kiss A.:** Lemezek alakíthatóságának átfogó értékelése, az $n - r$ vizsgálat alkalmazásai. Készült az OTKA T-037437 számú kutatási téma keretében, 2003. Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék, Témavezető: Dr. Tisza Miklós tanszékvezető
- [9] **Tisza M., Kiss A., Kovács P.:** Autókarosszéria gyártásához alkalmazott lemezek újszerű alakíthatósági vizsgálata VIALUX-autoGrid optikai mérő-kiértékelő rendszerrel, XXIII. microCAD International Scientific Conference, 19-20 March 2009, University of Miskolc.
- [10] **Tisza M., Kovács P.:** Korszerű vizsgálati módszerek lemezanyagok alakíthatóságának elemzésére, Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2012, Szolnok, pp. 163-172.

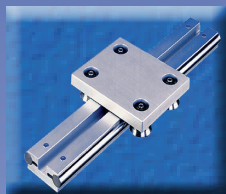


DIN EN ISO 9001:2008
minősítési tanúsítvánnyal
rendelkezünk

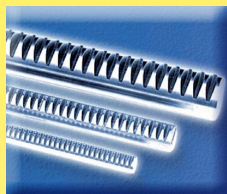
50 éve a meghajtástechnika és a lineáris rendszerek szakértői

Áruszállítás mindennap világszerte hamburgi raktárunkból

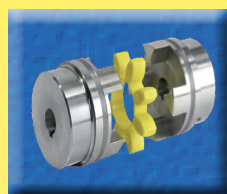
alumínium görgős vezetések



fogasléc



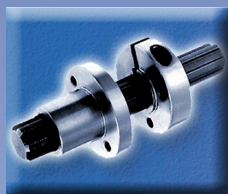
tengelykapcsolók



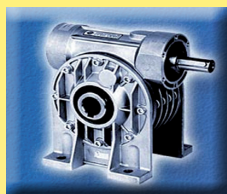
fogaskerek



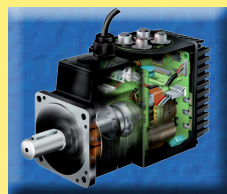
bordástengelyek



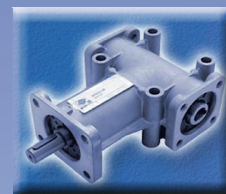
csigahajtások



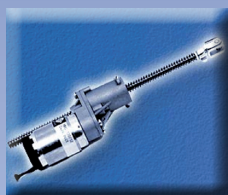
szervomotorok



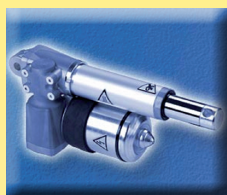
kúpkerekes hajtóművek



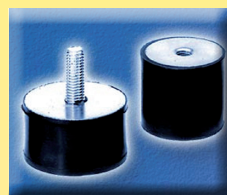
mini csavarorsós hajtómű



csavarorsós hajtómű



gumi- fémkütközők



mágneses tengelykapcsolók



csuklós tengelyek



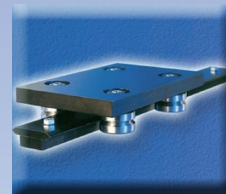
szabadonfutók



géplábak



lineáris rendszerek



Látogassa meg weboldalunkat és kérje ingyenes katalógusunkat!



Technische Antriebselemente GmbH - Lademannbogen 45 - 22339 Hamburg
Tel: + 49 40 5388921-0 | Fax: + 49 40 5388921-29 | Mail: info@tea-hamburg.de
Web: www.tea-hamburg.de | www.tea-hamburg.com | www.tea-hamburg.eu

JEGYZET

CONTENTS

1. Tisza M.; Kocsisné Baán M.; Marosné Berkes M.; Török I.:

MATERIAL DEVELOPMENTS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY 5

Under direction of University of Miskolc three Hungarian higher educational and a research institutes carry out research on material developments for the automotive industry. The sponsored basic research is aimed at metallic and non-metallic materials of cars as well as at formability, heat treating and welding of steels.

2. Balogh A.; Gáspár M.; Prém L.:

CLASSIFICATION AND WELDING DIFFICULTIES OF CONVENTIONAL AND ADVANCED STEELS FOR WELDED STRUCTURES 7

Established grouping system of steels did not keep pace with quick development of the modern high strength steels. Authors elaborated a timeless classification system for conventional and modern steels of welded structures. Welding of high strength steels brought to the surface much difficult problem.

3. Balogh A.; Prém L.:

RESISTANCE SPOT WELDABILITY OF FERRITE-MARTENSITE (DUAL PHASE) STEEL SHEETS 13

Authors have investigated resistance weldability of Docol DP 600, DP 800 and DP 1000 produced by the Swedish company SSAB. Weldability of the steel grade DP 600 is relatively good, but the other two grades require special welding technology.

4. Gáspár M.; Prém L.; Vékony S.; Balogh A.:

FINAL ELEMENT MODELLING OF TIG WELDING OF DP 600 AUTOMOTIVE STEEL 19

Manufacturers achieve the desired mechanical properties of ferrite-martensite DP steels with different forming and heat treating processes. Structure instability of advanced steels causes weldability problems. Paper presents the possibility of finite element modelling can be used for planning the technology of GTAW of steel sheets.

5. Meilinger Á.; Lukács J.:

BEHAVIOUR OF FRICTION STIR WELDED JOINTS MADE OF ALUMINIUM ALLOYS UNDER CYCLIC LOADING CONDITIONS 25

The research work aimed to examine the behaviour of the friction stir welded joints under cyclic loading conditions and to determine fatigue limit or design curves for aluminium alloys and their welded joints made by FSW process.

6. Somoskői G.:

LOW POWER ARC WELDING PROCESS VARIANTS AND THE MATERIAL TRANSFER AT THE GAS METAL ARC WELDING 31

Paper tries to make differences among the lots of welding process variants existing today in the welding machine market. It shows in details the low power process variants of GMAW, namely in the short-arc range.

7. Dobosy Á.; Gáspár M.; Prém L.; Meilinger Á.:

REPORT ON THE 1ST SUMMER UNIVERSITY ON WELDING 35

In July of this year the Junior Forum of Welding Section of Scientific Society for Mechanical Engineering (GTE) organised the 1st Summer University on Welding at the University of Miskolc. After listening the professional lectures young participants made contacts with one to others and with outstanding experts of welding in the course of cheerful programs.

8. Nagy Gy.; Dobosy Á.; Lukács J.:

RELIABILITY OF THE MATERIAL CHARACTERISTICS EVALUATED ON LOW CYCLE FATIGUE TESTING 39

Paper deals with the reliability analysis on the measured parameters during the low cycle fatigue test. Among others, it was established that the standard deviation coefficients of the stress amplitude was smaller than the other stress-like parameters determined by material testing.

9. Lukács J.; Kuzsella L.; Dobosy Á.; Pósalaky D.:

EVALUATION OF THE HOT-CRACKING SENSIBILITY ON WELDING APPLYING PHYSICAL SIMULATION 45

Authors analyse the relationship of weldability and hot cracking sensitivity with physical simulation. They present the results of investigations carried out on two high strength steels and an aluminium alloy using the Gleeble 3500 type simulator.

10. Kerekes G.; Kocsisné B. M.; Felde I.:

QUALIFICATION OF QUENCHING MEDIA 51

The shape of a cooling curve depends on the type of cooling media and the parameters describing the condition of quenchant. In this paper the influence of main parameters (temperature, agitation rate, concentration) on the cooling rate is shown.

11. Tisza M.; Kovács P. Z.:

FORMING THE SHEET METALS, INVESTIGATING THE DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT DIAGRAMS 55

Application of high strength steels often leads to formability problems in the automotive industry. Authors describe their theoretical and experimental investigations on forming limit diagrams considered the most appropriate tools for characterizing the formability of metal sheets.

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of
Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám
President of Editorial Board

Vesza József
General Editor

Dr. Jármái Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
Deputy

Dr. Barkóczi István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bercsey Tibor
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Dudás Illés
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Kármán Antal
Dr. Kalmár Ferenc
Dr. Orbán Ferenc
Dr. Pálkás István
Dr. Patkó Gyula
Dr. Péter László
Dr. Penninger Antal
Dr. Rittinger János
Dr. Szabó István
Dr. Szántó Jenő
Dr. Szűcs Edit
Dr. Tímár Imre
Dr. Tóth László

Cooperation in the editing:

Dr. Balogh András
Dr. Lukács János
Dr. Nagy Gyula
Dr. Török Imre

Dear Reader,

Three higher education institutions – the University of Miskolc, the Széchenyi István University in Győr, and the College of Kecskemét – together with the Bay Zoltán Non-profit Ltd. for Applied Researches won a new project within the New Széchenyi Development Plan in the Social Revival Operative Program (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV) with the title “*Materials development for the vehicle industry: targeted fundamental research in the fields of formability, heat-treatment and weldability*”. The Institute for Materials Science and Materials Processing at the University of Miskolc (its former name: Department of Mechanical Technology) is the leader of the research consortium. The duration of the project is 24 months, the financial support amounts to 473 million HUF. The project started on 1st January 2013 and will be finished on 31st December 2014.

The main objective of the project is to perform integrated research activities in the fields of materials sciences and materials processing technologies utilizing the global worldwide tendencies, the cooperation of the consortium members, as well as foreign and domestic partner institutions.

The vehicle industry (particularly the automotive industry) is the leading strategic sector in the Hungarian economy with high added value: this is a knowledge-intensive industrial sector providing a significant part of the GDP. Weight reduction of the vehicles can be regarded as one of the most important development trends in the world automotive industry resulting in the elaboration of the so-called light weight design principles. Concerning the materials, the application of high strength steels, aluminium and other light metallic alloys, as well as the application of fibre reinforced plastic materials are the main possibilities to meet these requirements. Application of these new materials requires the application of new innovative methods in the fields of manufacturing technologies, thus leading to new technological process developments, too. Development of new materials and new innovative manufacturing processes, as well as their synergic developments are the main competencies of the partner institutions participating as the members of the consortium in this project. The industrial application of these new materials and new processes is also an important research target to increase the international competitiveness of the national automotive industry.

On the basis of the aforementioned tendencies and requirements, the main research activity in this project on the material side will be focused on the application of high strength steels, various light metals and alloys (with an increasing importance of aluminium and magnesium alloys) whilst concerning the technological processes the formability, heat-treatability and weldability of these advanced materials are of primary importance.

The research activity is going on in 5 Scientific Groups within 17 R&D research topics. In this issue of the GÉP journal, the results achieved till now within this project will be overviewed. As it was mentioned at the beginning of this foreword, this research work is performed in the framework of New Széchenyi Development Plan. The realization of the project is supported by European Union and co-financed by the European Social Fund.

Prof. Dr. Miklós Tisza

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.
Postage-address: 3501. Pf. 55. Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+36-30) 9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1027 Budapest, Fő u. 68.
Postage-address: 1371, Bp, Pf. 433
Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: a.gaby@gteportal.eu, Internet: www.gte.mtesz.hu
Responsible Publisher: Dr. Igaz Jenő Managing Director

<http://www.gepujsag.hu>
Printed by Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67.
Price per month: 1260 Ft.
Distribution in foreign countries by Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat H-1389
Budapest, Pf. 149. and Magyar Média H-1392 Budapest, Pf. 272.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

All articles are peer reviewed.

MEGA.PULS FOCUS

és "Az energia nem vész el..."



MEGA.gyors
MEGA.biztos
MEGA.egyszerű
MEGA.gazdaságos
MEGA.PULS FOCUS

REHM
Hegesztéstechnika

2766 Tápiószele, Jászberényi út 4.

Telefon: (53) 380 078; Fax: (53) 380 582

Web: www.rehm.hu E-mail: rehm@rehm.hu

A technológiai előnyök alapján kifejlesztett TPS/i fogyóelektródás hegesztő berendezés kiszélesíti a lehetőségek határait. Az ember és gép közötti kommunikáció továbbfejlesztése az, amit beépítettünk a rendszerbe, azonban nem álltunk meg itt: megteremtettük felhasználóink számára a befektetés lehetőségét egy olyan intelligens rendszerbe, amely nyitott az új alkalmazásokra és folyamatosan fejleszthető. Mindez gyorsabb és pontosabb hegesztési lehetőséget jelent kevesebb fröcskölés és stabilabb ív mellett. Az intelligens hegesztés technológia forradalma még csak most kezdődik.



HATÁROKAT FESZEGETVE

**»HEGESZTŐ RENDSZER MINDEN ESETRE.
KEVESEBB GOND, NAGYOBB TELJESÍTMÉNY.
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE.«**



Froweld Kft.
1239 Budapest,
Grassalkovich út 255.
Telefon +36 1 287 8477
Telefax +36 1 287 8476
info@froweld.hu
www.froweld.hu