

# NAGY SZÉNTARTALMÚ ACÉLOK HEGESZTETT KÖTÉSEINEK FÁRADÁSOS TULAJDONSÁGAI

MAGASDI ATTILA <sup>(1,a)</sup>, DOBRÁNSZKY JÁNOS <sup>(2,b)</sup>

<sup>(1)</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Anyagtudomány és Technológia Tanszék

<sup>(3)</sup> Magyar Tudományos Akadémia Fémtechnológiai Kutatócsoport  
1111 Budapest, Goldmann tér 3., Hungary

a) [dobi@eik.bme.hu](mailto:dobi@eik.bme.hu); b) [magasdi@eik.bme.hu](mailto:magasdi@eik.bme.hu);

*Az eutektoidos acélok egyik legelterjedtebb alkalmazási területe a faipari szalagfűrészlapok gyártása. A gyártmányokkal szembeni fontos elvárás nagy vágási élettartam. Ezt a tulajdonságot az élettartóságon kívül a kifáradással szembeni ellenállás biztosíthatja. Különösen kényes része a szalagfűrészlapnak a hegesztési varrat, amelynek megfelelő minőségét csak a nagy C-tartalmú alapanyag hegesztésének helyes kivitelezése képes garantálni. Hegesztett kötések fárasztóvizsgálata nyomán ennek a hegesztési technológiának a lényegét jelentő utólagos hőkezelés hatását mutatja be a dolgozat.*

## Bevezetés

A fűrészüzemek folyamatosan növekvő igényei a fűrészlapgyártókkal szemben is egyre növekvő követelményeket támasztanak. A modern termelési igények kielégítése érdekében a szalagfűrész lapoknak egyre nagyobb vágási pontosságot kell biztosítaniuk, amely csak a lapok előfeszítésének növelésével érhető el. Ezért az egyik fő fejlesztési irány a nagyobb feszíthetőségű szalagfűrészlapok kidolgozása. A megnövekedett terhelés természetesen növeli a szalagfűrészlapok kifáradási veszélyét is [1]. A nagy karbontartalmú acélok, melyek a fő alapanyagai a szalagfűrészlapoknak, kiváló fáradási tulajdonságokkal rendelkeznek. A hegesztett kötés, mellyel a lapokat végtelenítik, azonban inhomogenitást és ezáltal belső feszültségeket okoz a fűrészlaptestben, melyek mikromágneses mérésekkel ki is mutathatók [2]. Az így fellépő belső feszültségek a fűrészlap fáradásos tulajdonságait jelentősen rontják. Hegesztést követő hőkezeléssel a húzó irányú maradófeszültségek megszüntethetők, és nyomó irányú feszültségek hozhatók létre, melyek növelik a szerkezet fáradással szembeni ellenálló képességét [3].

A nagy karbontartalmú acélok hegesztésének egyik legfőbb problémája a hidegrepedés [4]. A jelenség elkerülhető előmelegítéssel és hegesztést követő hőkezeléssel. A hegesztés és a hőkezelések technológiai paraméterei mind a kötés szilárdságát, mind a fáradási tulajdonságait befolyásolják. Ezért a megfelelő szilárdságot és fáradási tulajdonságokat biztosító hegesztési és hőkezelési paraméterek meghatározása elengedhetetlen a minőségi hegesztett kötés készítéséhez. A keresett paraméterek meghatározására kisciklusú fárasztóvizsgálaton alapuló kísérletsorozatot végeztünk.

## Hegesztési kísérletek

A hegesztési paraméterek fáradásra gyakorolt hatását hogy megvizsgáljuk, hegesztési kísérleteket végeztünk. A kötések automatizált hegesztőberendezéssel készültek, hogy az emberi tényezőt kizárjuk. A felhasznált alapanyag 1,25 mm vastagságú, C75 anyagú ötvözetlen szénacél szalag volt. Az alapanyag kémiai összetétele az 1. táblázatban látható. A hegesztés mellett alkalmazott hőkezelés egy hegesztést megelőző előmelegítésből és egy hegesztést követő hűn tartásból állt. Az előmelegítés és a hűn tartás hőmérséklete azonos volt. A hőkezelések két paramétere így az előmelegítési hőmérséklet

és a hegesztést követő hőkezelés időtartama. A megfelelő paraméterek alkalmazásával a varratban és a hőhatásövezetben kialakuló rideg fázisok megjelenése és egyben a hőhatásövezet kilágyulása is elkerülhető. E követelmények mellett a hőkezelési paramétereknek a legjobb, kifáradással szembeni ellenállást is biztosítaniuk kell.

Acéltípus	C	Si	Mn	P	S	Cr	O	N	H
C75	0,74	0,19	0,62	0,009	0,002	0,35	0,0048	0,0079	0,00056

1. táblázat. Az alapanyag kémiai összetétele

A próbahegesztések argon védőgázos fogyóelektródás ívhegesztéssel készültek, Ar + CO<sub>2</sub> keverék védőgázzal. A felhasznált hozaganyag ötvözetlen, kis karbontartalmú, 0,8 mm átmérőjű huzal volt. A hegesztés során használt paraméterek a 2. táblázatban láthatók. A paraméter, melynek hatását vizsgáltuk a fáradási tulajdonságokra, a hegesztést követő hőkezelés ideje volt. A próbahegesztések öt különböző hőntartási idővel készültek, kettőtől hat percig. A hőkezelést követően a próbavarratokat nyugvó levegőn hűtöttük le.

Hegesztő- áram	Ívfeszültség	Hegesztési sebesség	Huzal- előtolás	Előmelegítés	Védőgáz	Védőgáz- hozam
A	V	cm / perc	m / perc	°C		liter / perc
16,5	36	22	1,9	425	Ar + 2,5% CO <sub>2</sub>	12

2. táblázat. Hegesztési paraméterek

A fárasztóvizsgálathoz a próbatesteket a próbavarratokból síkköszörüléssel készítettük el. A próbatestek nem tartalmaztak bemetszést, mivel a varrat és környékének inhomogén zónája már eleve biztosított egy feszültséggyűjtő szerkezetet.

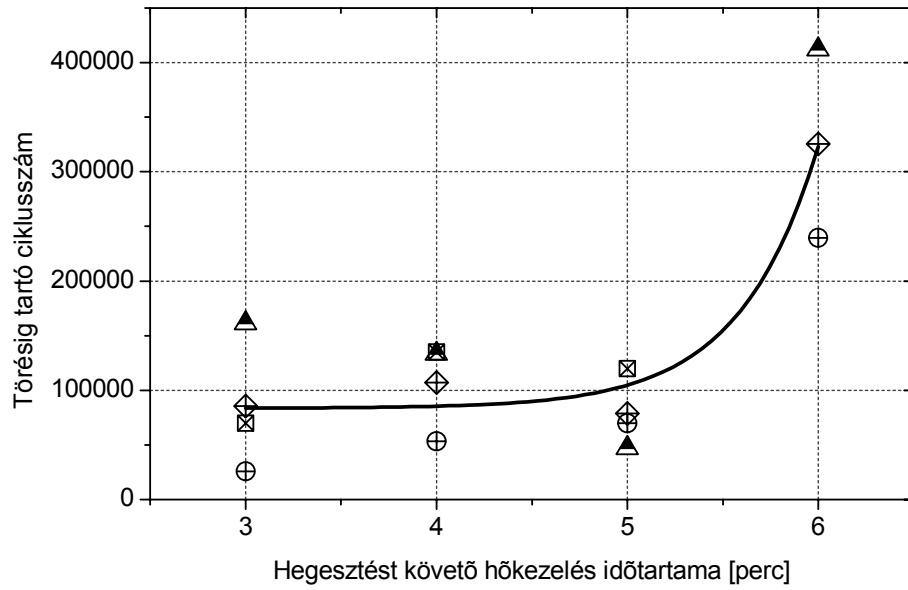
## Vizsgálatok és eredmények

A fáradási tulajdonságok vizsgálatára fárasztóvizsgálatot végeztünk. A próbatesteket MTS 810 szervo-hidraulikus fárasztógépen vizsgáltuk. A vizsgálat során erővezérlést alkalmaztunk: terhelésnek szinuszos lüktető-húzó terhelést választottunk, egyszerűsített "vágáskörnyezeti" terhelésként. Középfeszültségnek 680 MPa-t, amplitúdónak pedig 400 MPa-t választottunk, míg a terhelés frekvenciája 25 Hz volt. A mért paraméter a törésig tartó ciklusszám volt.

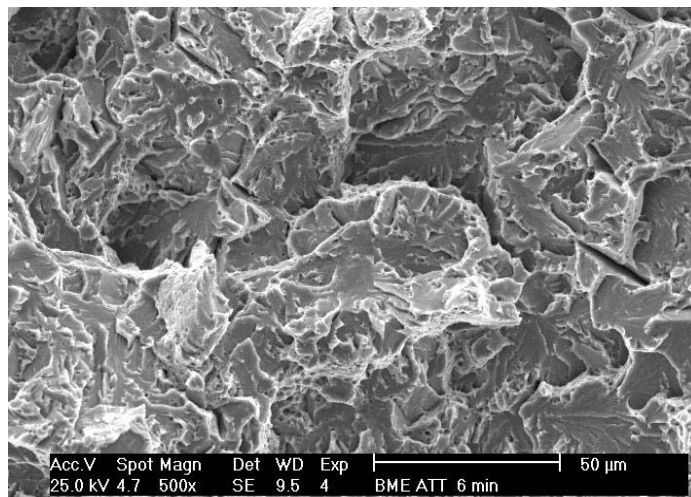
A repedés megjelenését és a repedésterjedést nem vizsgáltuk, mivel az néhány terhelési ciklus alatt lezajlott. Az 1. ábrán a próbatesteken mért, törésig tartó ciklusszámok láthatók a hegesztést követő hőkezelés időtartamának függvényében.

Ahogy az 1. ábrán is látható, a legjobb fáradási tulajdonságokat mutató varrat 6 perces hőntartási idővel érhető el. Ezen esetben a fáradásos törés a hőhatásövezetben zajlott le, míg a többi próbatest esetében a varratban zajlott le a repedésképződés és -terjedés, a HSLA acélokhoz hasonlóan [5].

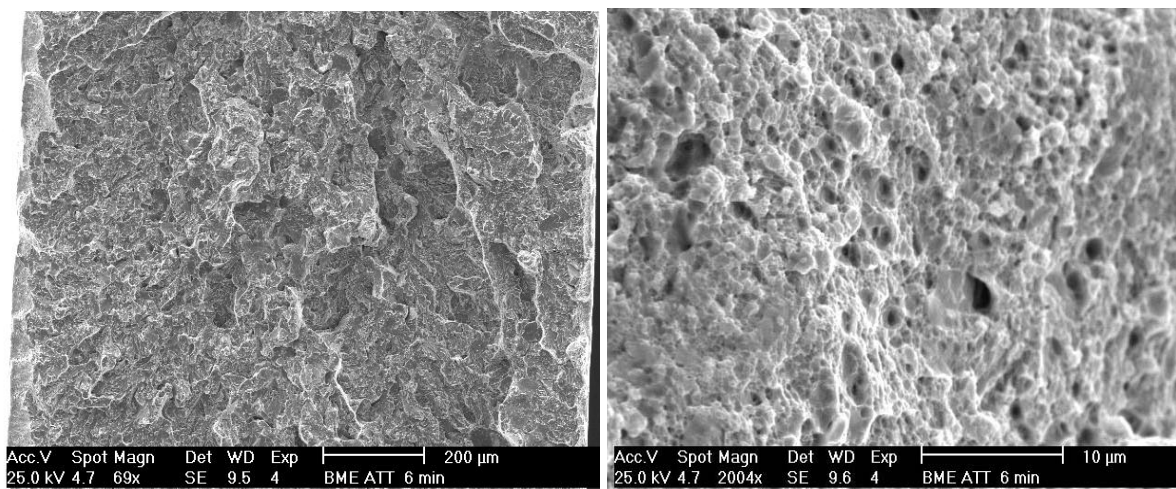
A fárasztóvizsgálatot követően a kapott töretfelületeket is megvizsgáltuk. A vizsgálathoz pásztázó elektronmikroszkópot használtunk. A töretfelületek jelentős hányada rideg jellegű, és mintegy 5%-a volt csak szívós (2. ábra). A szívós jellegű töretfelületek a keresztmetszet széleinél voltak csak fellelhetők. A 3. ábra kis nagyítású felvételén (balra) a keresztmetszet teljes szélessége látható, a nagy nagyítású felvételén (jobbra) pedig a szélek szívós töretfelülete.



1. ábra. Törésig tartó ciklusszám a hegesztést követő hőkezelés ideje függvényében

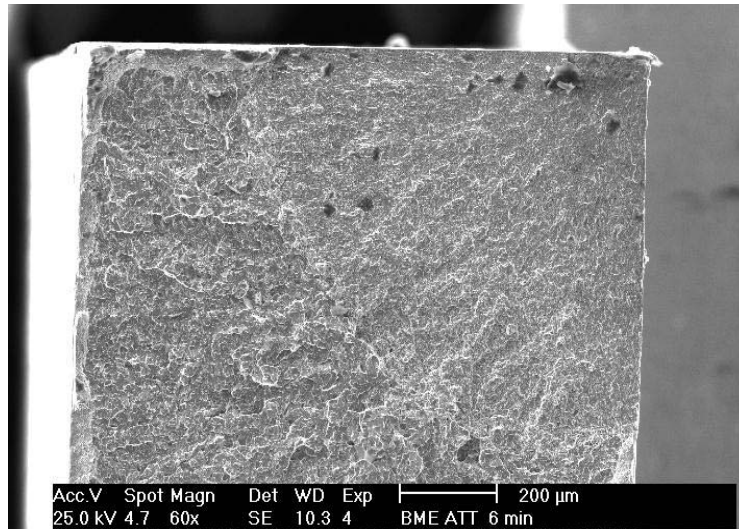


2. ábra. Rideg törtfelület a hőhatásövezetben



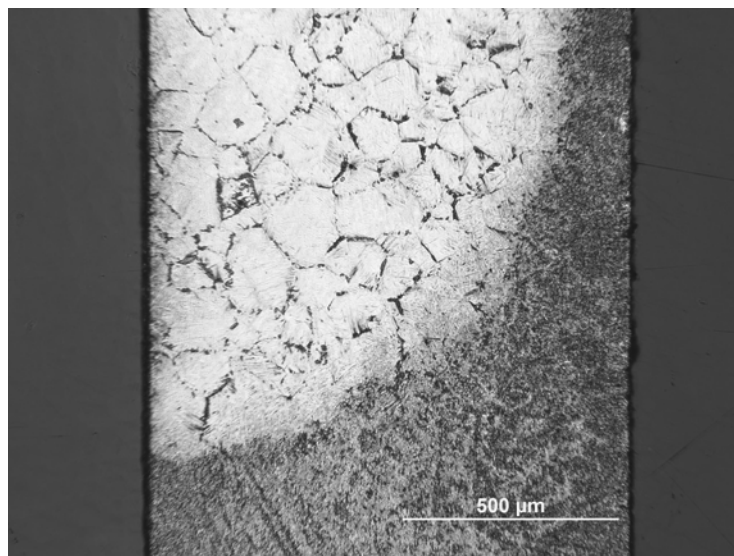
3. ábra. A próbatest törtfelülete (bal) és a szívós tört a széleken (jobb)

A fáradásos törésre utaló nyomok is láthatók a próbatestek töretfelületein. A repedés kiindulási pontja, ahogy a radiális vonalak is mutatják a 4. ábrán, a keresztmetszet sarkánál található, ahol a feszültségkoncentráció a legnagyobb.



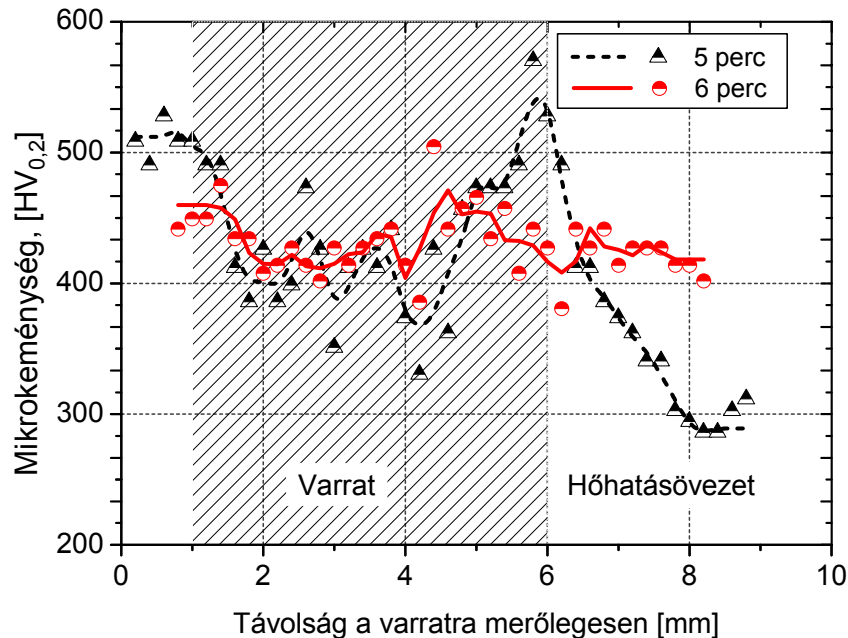
4. ábra. Fáradásos törés kiindulási pontja

A nem elégséges időtartamú hegesztést követő hőkezelés miatt a hőhatásövezetben kialakuló mikroszerkezetben martenzites fázis is előfordulhat, ridegítve a szerkezetet. A másik, tényező, mely hatással van a hőhatásövezet mechanikai tulajdonságaira, a hegesztési folyamat során kialakuló elsődleges ausztenit szemcsemérete. Túlzott hőközlésből adódóan az elsődleges ausztenitszemcsék átlagos mérete megnőhet, eldurvítva ezzel a szemcseszerkezetet, melyből a lehűlés során, a szobahőmérsékleten is stabil mikroszerkezet létrejön. Az így kapott varrat szövetszerkezete nem tudja biztosítani az elvárt mechanikai tulajdonságokat [6,7]. Megfelelő maratósi technikával az elsődleges ausztenitszemcsék határainak nyoma könnyen láthatóvá tehető, és így könnyen vizsgálható optikai mikroszkóppal (5. ábra). Emellett a másik, fáradással szembeni ellenállást befolyásoló tényező, a maradék ausztenit mennyisége a varratban és a hőhatásövezetben, amely visszaszórtelektron-diffrakcióval (EBSD) [8], röntgendiffrakcióval [9,10], mikromágneses módszerekkel [2,11] vagy Mössbauer-spektroszkópiával [12] mérhető, illetve számítható [13]. Az optimális maradékausztenit-mennyiség megfelelő előmelegítéssel és hegesztést követő hőkezelési időtartammal biztosítható.



5. ábra. Martenzit a hőhatásövezetben (világos, a sötét rész a varrat)

A varrat és a hőhatásövezet mechanikai tulajdonságainak a kötés menti eloszlását mikrokeménység mérésekkel vizsgáltuk. A próbatest keménységét a felülettel párhuzamosan és a kötésre merőlegesen mértük. A mérést 0,2 mm-es lépésközzel végeztük, hogy megkapjuk a hőhatásövezet és a varrat mikrokeménységeloszlását. Az 5 és a 6 perces, hegesztést követő hőkezelési idővel hegesztett próbatestek esetén mért értékek a 6. ábrán láthatók.

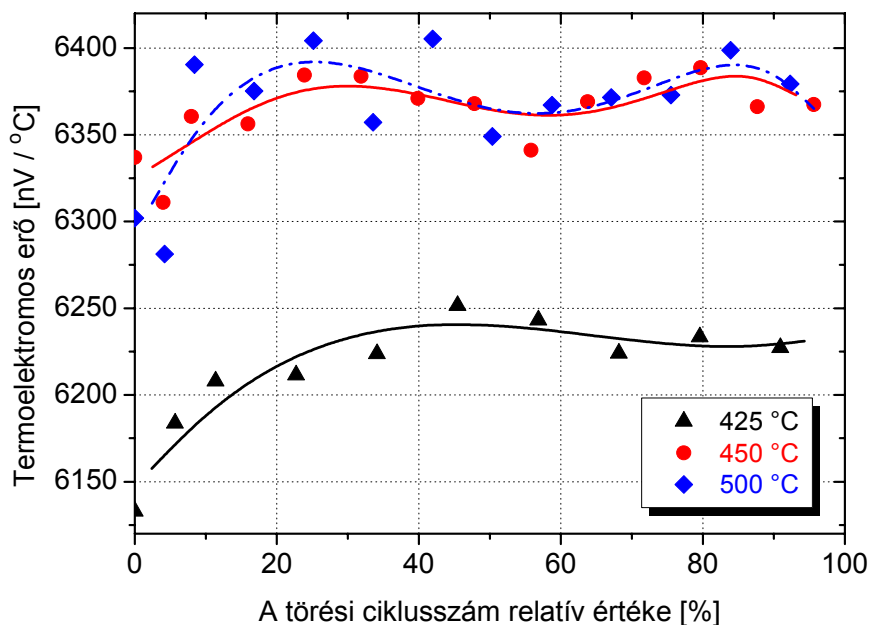


6. ábra. A hegesztett kötés keménységeloszlása

Az 5 perces, hegesztést követő hőkezeléssel készült próbatest esetében felkeményedés tapasztalható a hőhatásövezetben, ami rideg, kemény fázis jelenlétére utal. A varratban és a hőhatásövezetben mérhető keménységértékek közti különbség befolyásolja a fáradásos tulajdonságokat is, mivel növeli a belső feszültségeket a kötés környezetében. A 6 perces, hegesztést követő hőkezeléssel készült próbatest esetében a varrat és a hőhatásövezet keménységi értékei közti kis különbség nem okoz jelentős csökkenést a hegesztett kötés fáradásos tulajdonságaiban.

A fáradási folyamat indukálta termoelektromos jellemzők megváltozását termoelektromos méréssel vizsgáltuk. A vizsgálathoz három, különböző hőmérsékleten, de azonos ideig hőkezelt (5 perc) mintát készítettünk. A termoelektromos erőt először a fáradtívizsgálatot megelőzően, majd az első 10000, és ezt követően minden 20000 ciklus után mértük. Minden mérést négyszer ismételtünk, hogy azokat átlagolva pontosabb adatokat kapjunk. A mért termoelektromos erő értékeit a százalékos élettartam függvényében a 7. ábra mutatja. Tisztán látható, hogy a kisebb előmelegítési hőmérséklethez (425 °C) tartozó görbe elkülönül a többi görbétől. A fáradás kezdeti ciklusai során a mért értékek növekednek, majd a görbe konstans értéken marad. A nagyobb előmelegítési hőmérsékletre tartozó görbék esetén a kezdeti emelkedést egy enyhe visszaesés követi a mért termoelektromos erő értékeknél.

A különbség a kisebb és nagyobb hőmérsékletű előmelegítések esetén létrejövő, eltérő karbid-szerkezettel magyarázható, mivel a diffúziós feltételek eltérőek a vizsgált hőmérsékleteken és a termoelektromos erő mérése nagyon érzékeny a diffúzió meghatározta karbid-szerkezetre. A 425 °C-s előmelegítéskor a fáradási folyamat kezdetén a terhelés egy ciklikus lágyulást indukált a próbatestben, mivel a nemegyensúlyi karbidstruktúra feszültségszerkezete az egyensúlyi felé kezdett változni. A nagyobb hőmérsékletű előmelegítések esetében a karbid-szerkezet egyensúlyi közele, ezért a fáradási folyamat indukálta képlékeny alakváltozás csak a szövetszerkezetben található ferrit keményedését okozza; ez pedig csökkenti a termoelektromos erőt, habár ez a keményedési folyamat hamar lelassul, és a ciklikus lágyulás lassan növelni kezdi a mérhető termoelektromos erőt.



7. ábra Termoelektromos erő a százalékos élettartam függvényében

### Következtetések

A vizsgálatok eredményei alapján a fáradás szempontjából legérzékenyebb zóna a fúziós vonal és a szemcsedurvult tartománya a hőhatásövezetnek. A megfelelő előmelegítési hőmérséklettel illetve hűntartási idővel a varrat és a hőhatásövezet fárasztással szemben is ellenálló mikroszerkezete biztosítható.

Az ipari szalagfűrész káresetek 90%-áért, mint a fogtőrepedés, a martenzites szövetszerkezet jelenléte a felelős. Ezért a megfelelő hőkezeléssel a rideg martenzites fázisok kialakulása a hőhatásövezetben elkerülendő, máskülönben a kötés szívósságának csökkenése mellett annak fáradási érzékenysége is rohamosan növekszik.

A legrövidebb, hegesztést követő hőkezelési idő: 425 °C-s előmelegítés mellett, 6 perc kell legyen. Rövidebb hőkezelési idők nem garantálhatják a megfelelő, fáradással szembeni ellenállást. Mindezek mellett a 6 perces hőkezelés esetén a fáradási törés helye a hőhatásövezet, és nem a fúziós vonal, mint a rövidebb hőkezelési idők esetében.

A termoelektromos erő mérése nagyon érzékenyen követi a mikroszerkezeti változásokat, melyek a fáradási folyamat alatt játszódnak le. A termoelektromos erő mérés érzékenysége a mikroszerkezeti különbségekre egy új eljárást nyújthat a fáradásos törés folyamatának megismerésére.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alapprogram támogatta. A kutatási téma száma: OTKA T43571. Dobránszky Jánost a kutatásban az MTA Bolyai Ösztöndíjjal támogatta.

## Irodalomjegyzék

- [1] Suresh S: Fatigue of Materials. Cambridge University Press, (1998) p. 297-302.
- [2] Mészáros I: Micromagnetic Measurements and Their Applications. Materials Science Forum, 414-415 (2003) p. 275-280.
- [3] Cheng X, Fisher JW, Prask HJ et al. : Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures. International Journal of Fatigue, 25 (2003) p. 1259-1269.
- [4] Mohandas T, Madhusudan Reddy G, Satish Kumar B: Heat affected zone softening in high-strength low-alloy steels. Journal of Materials Processing Technology, 88 (1999) p. 284-294.
- [5] Onoro J, Ranninger C: Fatigue behaviour of laser welds of high-strength low-alloy steels. Journal of Materials Processing Technology, 68 (1997) p. 68-70.
- [6] Prohászka J: Fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai. Műegyetemi Kiadó (2001) p. 233-236.
- [7] Ginzler J, Nam SW, Szabó PJ: Factors affecting the change of 15Mo3 steel during creep. Materials at High Temperatures 21 (2005:4) 187-192.
- [8] Berecz T, Szabó PJ: Study of the Isothermal Phase Transformations in Duplex Stainless Steels by EBSD Method. Materials Science Forum, 473-474 (2005) p. 177-182.
- [9] Eleőd A, Ziaja Gy, Stefániay V, Sajó I: Hidrosztatikus nyomás alatt végzett alakíthatósági vizsgálatok. Anyagvizsgálók lapja, 10 (2000:3) p. 80-83.
- [10] Nagy E, Mertinger V, Tranta F, Sólyom J: Az alakítási textúra hatása a saválló acélokban végbe-menő fázisátalakulásokra, Anyagok Világa, 4 (2003:1)  
[http://www.materialworld.uni-miskolc.hu/tartalom/2003/nov/nagy\\_e.pdf](http://www.materialworld.uni-miskolc.hu/tartalom/2003/nov/nagy_e.pdf) (2006-08-31)
- [11] Kovács J: Csapágyacélok maradékausztenit-tartalmának meghatározása. Bányászati és kohászati lapok, Kohászat 130 (1997:8-9) p. 272-279.
- [12] Mészáros I, Káldor M, Hidasi B, Vértes A, Czakó-Nagy I: Ausztenites saválló acélban alakítás hatására keletkezett martenzites fázisok vizsgálata mikromágneses módszerrel és Mössbauer-spektroszkópiával. Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, 128 (1995.7-8) p. 253-257.
- [13] Réti T: The Influence of Change of Temperature Rate on the Kinetics of Non-isothermal Transformations. Gépgyártástechnológia, 39 (1999:9), p. 33-38.