

VERŐ BALÁZS

## Az ultrafinom szövetszerkezet kialakításának lehetséges útjai és ezek kapcsolatrendszere

A dolgozatban a szerző a Dunaújvárosi Főiskolán folyt TÁMOP 4.2.2. - 08/2008-0016 projekt 2. kutatási területén végzett kutatómunka eredményeit egységes rendszerbe foglalva tárgyalja, rámutatva az egyes részterületek közötti szerves összefüggésrendszerre. A kutatómunka egyik leglényegesebb felismerését az jelenti, hogy a léces martenzites kiinduló állapot az IKA-eljárásokkal elérhető diszlokációsűrűséggel nagyságrendileg megegyező diszlokációsűrűsége miatt megfelelő kiindulási állapotot jelent az UFG- vagy NG-állapot eléréséhez.

### 1. Bevezetés

A Dunaújvárosi Főiskolán 2009-2012 között Európai Unió támogatással folyt a TÁMOP 4.2.2. -08/2008-0016 projekt, melynek néhány eredményéről a BKL Kohászat hasábjain már beszámoltunk [1, 2]. Ennek a projektnek az 1. kutatási területe az acélok meleghengerlési technológiájának fizikai és matematikai szimulációjával [3], míg a 2. kutatási területe az ultrafinom és nanoszerkezetű tömbi anyagok szemcseszerkezete és tulajdonságai közötti kapcsolattal foglalkozott. Ez utóbbi kutatási feladat teljesítése érdekében végzett munkáról, annak eredményeiről 13 részjelentésben, jegyzőkönyvben, mintegy 500 oldalnyi dokumentumban számoltunk be.

A kutatómunka sokrétűsége, az elkészült dokumentumok terjedelme szinte lehetetlenné teszi minden egyes részeredmény bemutatását, még felsorolásszerűen sem.

A 2. kutatási területen elért eredményeket a közöttük feltárt kapcsolatok segítségével világítjuk meg. A kapcsolatrendszer elemeinek bemutatásával lehet bizonyítani, hogy a

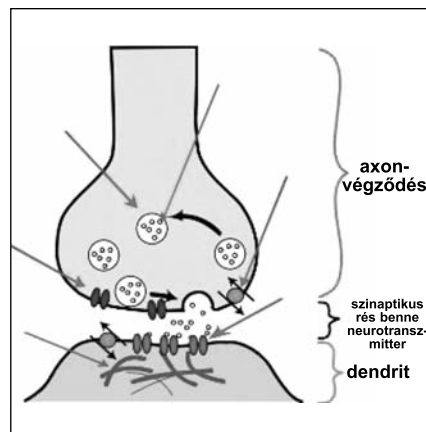
Verő Balázs szakmai életrajzát lapunk 2012/1. számában közzéltük.

kutatási terület feladatainak megoldásán dolgozó kutatócsoport a nanovagy ultrafinom szemcsés fémek és ötvözetek témakörében átfogó, a nemzetközi színvonalat megközelítő és sok esetben azt meghaladó ismeretek birtokába jutott. Ez egyben azt is jelenti, hogy ezek az ismeretek szervesen beépülhetnek a Dunaújvárosi Főiskolán folyó anyag- és gépészmérnöki oktatás tananyagába, és így a Dunaújvárosi Főiskola egyre jobb eséllyel pályázik hazai és nemzetközi – például FP8-as vagy Horizon 2020 – projektben való részvételre, közreműködésre.

### 2. A projekt alap gondolata

Az emberi agy teljesítőképességét nem az agy térfogata, nem az idegsejtek száma, hanem az azok között kialakuló kapcsolatrendszer sokrétűsége határozza meg. A szinapszisok azok a sejtek közötti kapcsolódási helyek, amelyeken keresztül az ingerület egyik sejtről a másikra terjed át, kémiai neurotranszmitter anyag közvetítésével, vagy a sejtmembránok szoros kapcsolatainál közvetlenül a két szomszédos sejt membránján átterjedő ioncsatornák közreműködésével. Az 1. ábrán az idegsejtek közötti szinaptikus kapcsolat elve látható.

Az ultrafinom szövetszerkezet



1. ábra. Az idegsejtek közötti szinaptikus kapcsolat elve. Wikipédia, Szinapszis

elérésére irányuló kutatómunka „idegsejtjei” a következők voltak:

- I. Szobahőmérsékletű IKA-kísérletek rézzel mint modellanyaggal
  - könyöksajtózási kísérletek (ECAP Equal Channel Angular Pressing),
  - többtengelyű kovácsolási kísérletek (MF – Multiaxis Forging),
  - a könyöksajtolt és a többtengelyű kovácsolást elszenvedett minták részletes fémtani vizsgálata,
  - a könyöksajtolás folyamatának analitikus és végelesemes szimulációja.
- II. Szabályozott hőmérséklet-vezetőségű MF-kísérletek C-Mn acéllal – DIFT (Deformation Induced Ferritic Transformation)
  - a DIFT-eljárás során kialakuló ultrafinom szövet szemcseméretének, szemcseméret-eloszlásának és textúrájának vizsgálata, elsősorban SEM + EBSD-technikával.
- III. LMDA-kísérletek C-Mn acéllal (LMDA – Lath Martensite Deformed Annealed)

- a léces martenzit felépítésének és orientációs viszonyainak vizsgálata,
- az edzett, majd alakított és lágyított minták szövetszerkezeti jellemzőinek vizsgálata TEM-módszerrel és röntgendiffrakciós profilanalízissel.

A következőkben az egyes kutatási részterületeken elért eredményeket és a közöttük meglévő szerves kapcsolatrendszerrel mutatjuk be.

### 2.1. Szobahőmérsékletű intenzív képlékenyalakítási kísérletek

Az I. kutatási terület eredményeként a felhalmozódott ismeretek közül a fémek és ötvözetek telített állapotára vonatkozóak a leglényegesebbek. A telített állapot itt a diszlokációsűrűségre vonatkozik. Kitént, hogy az f.k.sz. rácsú réz  $\varphi \geq 1$ -nél egyenértékű alakváltozással könyöksajtolás vagy többtengelyű kovácsolás közben telített állapotba jut. Erre az állapotra az jellemző, hogy az egyenértékű alakváltozás további – akár  $\varphi = 10$ -re – való növelése számottevő alakítási keményedést már nem okoz, sőt a diszlokációsűrűség sem változik. A folyási határ az egyenértékű alakváltozás mértékének növekedésével ugyanolyan jelleggel változik, mint a diszlokációsűrűség. A 2. ábrán [4] nyomán mutatjuk be ezt nagy tisztaságú alumíniumra nézve. Ez az analógia teszi lehetővé az alakváltozás makro- és mikromechanizmusának (diszlokációs mechanizmusának) egységes tárgyalását. Az OF-Cu-val végzett könyöksajtolási kísérleteink egyértelműen bizonyították, hogy  $\varphi > 2$  egyenértékű alakváltozás hatására  $12,4 - 16,4 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  diszlokációsűrűség alakul ki. A minták részletes röntgendiffrakciós profilanalízisének eredményét [5] nyomán az 1. táblázat mutatja, ahol:

q – az anyag rugalmas állandóitól és a mintában lévő diszlokációk típusától függő paraméter. Kőbös

kristályszerkezetű anyag esetén a diszlokációk él/csavar jellegét adja meg. Az általunk vizsgált anyagokra:

	q (él/csavar)
Cu	1,7/2,3
ferrit (bcc)	1,3/2,7
ausztenit (fcc)	1,6/2,3

M – diszlokációelrendeződési paraméter. Ha az ellentétes Burgersvektorú diszlokációk dipóllokba rendeződnek, akkor leárnyékolják egymás deformációs terét. A diszlokációk minél inkább leárnyékolják egymás deformációs terét (dipóllokba rendeződnek), annál kisebb lesz M értéke;

$\rho$  – az átlagos diszlokációsűrűség, kétfajta definíciója is van: 1. az egységnyi felületet átdőfő diszlokációvonalak száma; 2. egységnyi térfogatban lévő diszlokációvonalak együttes hosszúsága;

m – a szemcseméret-eloszlás középértéke (mediánja), ami az a méret, aminél kisebb és nagyobb szemcsék egyenlő valószínűséggel található az eloszlásban;

$\sigma$  – a szemcseméret-eloszlás szórása (varianciája), ami az eloszlás szélességére jellemző;

$\langle x \rangle_{\text{area}}$  – a szemcseátmérők felülettel súlyozott átlaga,  $\langle x \rangle_{\text{area}} = m \cdot \exp(2,5\sigma^2)$ ; megjegyzés: a kiértékelés gömb alakú szemcséket és lognormális szemcseméret-eloszlást feltételez;

$\beta$  – az ikerhatárok átlagos sűrűsége százalékban.  $\beta$  számértékei azt mutatják, hogy 100 egymást követő {111} sík között átlagosan hány ikerhatár található.

A könyöksajtolási kísérletek analitikus és VEM-es szimulációja és a részletes fémtani vizsgálatok megmutatták, hogy a telített állapotra az ún. ELS, vagyis egy elnyújtott, réteges szövetszerkezet a jellemző, mintegy

200-500 nm-es rétegvastagsággal.

Mivel az alakváltozás a rétegek egymáson való elcsúszásával játszódik le, az egyenértékű alakváltozás növekedésével a diszlokációsűrűség nem változik. A rétegeket elválasztó falakban a diszlokációk önszerveződő mozgása játszódik le.

Elfogadva az ELS létét, a könyöksajtoláson átesett mintákat olyan kompozitnak tekinthetjük, amelynek mátrixát a kis diszlokációsűrűségű rétegek anyaga, míg az „erősítő” fázist a diszlokációs falak jelentik.

A diszlokációsűrűségnek és a mechanikai jellemzőknek az egyenértékű alakváltozás  $\varphi = 1$ -ről  $\varphi = 10$ -re való növekedése közben bekövetkező mintegy 10-15%-os növekedése az ELS-nek a meglévő réteghatárokkal szöveget bezáró csúszási síkok aktiválásával és az ELS feldarabolásával magyarázható. Egy könyöksajtolás mintában kialakult jellegzetes réteges szövetszerkezetről korábbi dolgozatunkban [1] már közöltünk egy Radnóczy Gy. (KFKI-MFA) által készített TEM-es felvételt.

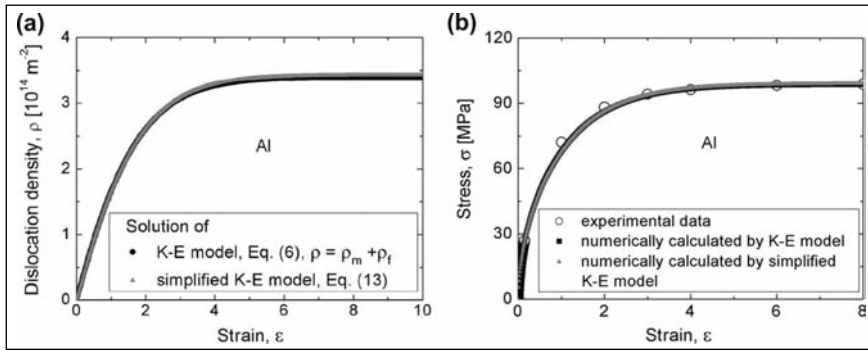
Bár ebben a kutatási részterületben nem foglalkoztunk az alumínium megleghengerlés közben kialakuló réteges szövetszerkezetének problémájával, valószínűsíthető, hogy a jelenség oka ugyanaz, mint az ELS kialakulásáé. Az alumíniumban megleghengerlés közben a szalag közepén nem tud az újrakristályosodás lejátszódásához szükséges mennyiségű energia felhalmozódni, mert az alakváltozás a réteghatárok mentén, és nem a rétegek közötti anyagban játszódik le [6].

A rézzel mint modellötvözetrel végzett többtengelyű kovácsolási kísérletek kapcsán elsősorban azt kell figyelembe venni, hogy még nagymértékű ( $\varphi \approx 10$ ) egyenértékű alakváltozás hatására sem változik a próbatest deformált részének alakja, mert a próbatest tengelyirányú alakváltozása gátolt. Ennek szükségszerű következménye, hogy a deformált térfogatban lévő kristallitok is megtartják eredeti alakjukat, de a szemcsehatáron belüli rész az adott kristallitnak a próbatest fő irányaihoz viszonyított orientációjától függő mértékben és jelleggel erőteljes alakváltozást szenved el.

Ennek a szövetszerkezeti állapotnak a vizsgálata még számos érde-

1. táblázat. Könyöksajtolással  $\varphi = 2$  mértékben alakított rézminta röntgendiffrakciós profilanalízisének eredményei

Minta	q	M	$\rho$ [ $10^{14} \text{ m}^{-2}$ ]	m [nm]	$\sigma$	$\langle x \rangle_{\text{area}}$ [nm]	$\beta$
Cu hossz. ker.	2,14	2,2	16,4	85,4	0,33	112	0
Cu mer. ker.	1,6	2,2	12,4	107	0,18	115	0,44



■ 2. ábra. A nagy tisztaságú alumínium folyási határának és diszlokációsűrűségének változása [4] nyomán: (Dislocation density = diszlokációsűrűség; Strain = valódi alakváltozás; Stress = folyási határ)

kes jelenséget tárhat fel. Itt csak az MF-technikával alakított minták újrakristályosító izzítása után kialakult szövet sajátosságaira utalunk.

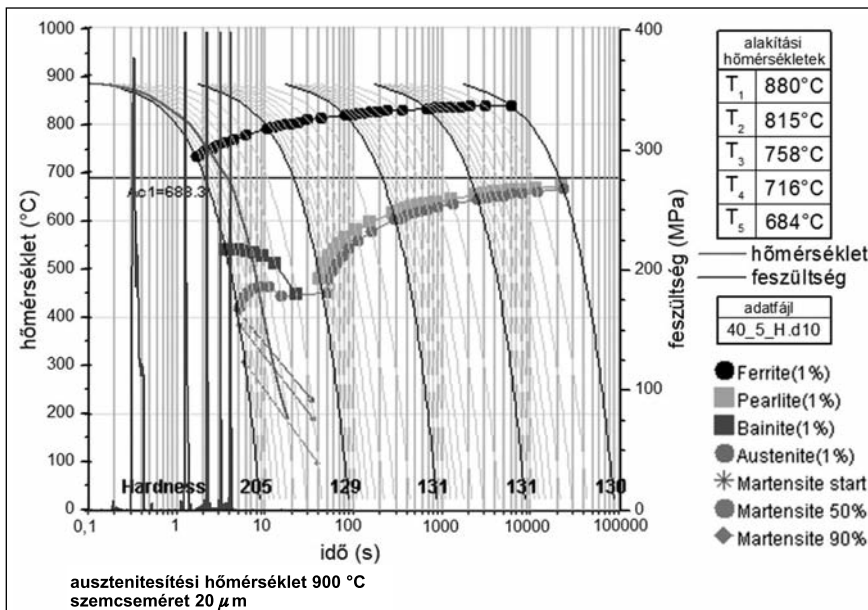
## 2.2. Acéllal végzett nagyhőmérsékletű, többtengelyű kovácsolási kísérletek

A t.k.sz. rácsú ötvözetekkel, nevezetesen egy C-Mn acéllal végzett nagy hőmérsékletű MF-kísérletek eredményének értelmezéséhez első pillanatra a szobahőmérsékletű, és rézzel végzett IKA-kísérletek tapasztalataival nem nyújthatunk segítséget. Mégis, több kapcsolódási pont is van a két kísérletsorozat eredményei között.

Elsőként azt kell kiemelnünk, hogy a réz az ausztenit modellanyagának tekinthető megegyező rács típusuk és

közül megegyező rétegződési hiba-energiájuk okán. Vagyis, amit az MF-technikával szobahőmérsékleten alakított Cu szövetszerkezetével kapcsolatban megállapítottunk, érvényesnek kell lennie az ausztenitnek  $T_{nr}$  újrakristályosodási küszöbhőmérséklete alatt végzett IKA alakítása során kialakuló szövetére is.

Ez azt jelenti, hogy a DIFT-technológia első két, ausztenites állapotban végzett nagymértékű ( $\varphi_i = 0,5$ ) és nagy alakváltozási sebességű alakításakor az ausztenit kristallitok alakja nem, míg belső deformációs struktúrája számottevően módosul. Valószínű, hogy a  $\varphi \approx 1$  körüli összalakváltozás hatására az ausztenit diszlokációsűrűsége nézve is telített állapotba kerül. Ez a megállapítás a DIFT-folyamat későbbi szakaszára is hatással van. A 3. ábrán a kérdéses



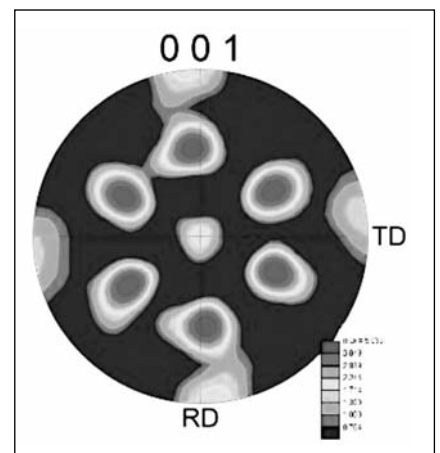
■ 3. ábra. A nagy hőmérsékletű MF-kísérletekhez használt acél folyamatos lehűlésre vonatkozó átalakulási diagramja az MF-folyamat jellemző adatainak feltüntetésével. Az átalakulási diagramot a JMatpro szoftverrel határozták meg [7]

acél folyamatos lehűlésre vonatkozó átalakulási diagramjában feltüntetjük a folyamatra jellemző lehűlési görbét, megadva azokat a hőmérsékleteket is, amelyeken a  $\varphi = 0,5$  egyenértékű alakváltozást eredményező alakítás megtörtént [7].

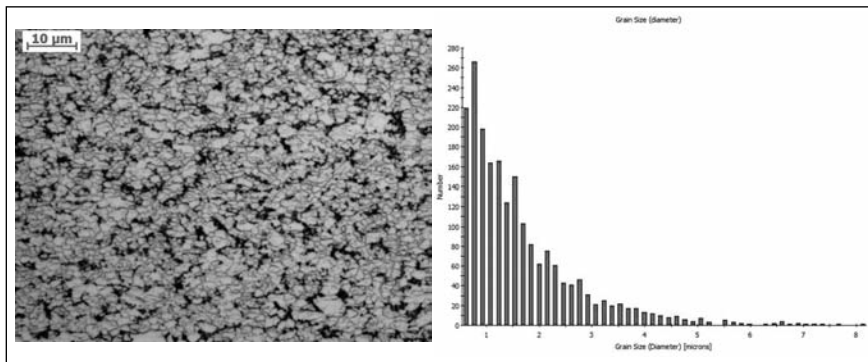
Tapasztalataink szerint a DIFT-technológia alkalmazása eredményeképpen kialakuló ultrafinom ferrites szövetet equiaxiális, és nem elnyújtott szemcsék alkotják, és a szövetre nagyon éles textúra a jellemző, a legerősebb textúrakomponens az (111)[112] típusú, és ennél lényegesen gyengébb a (001)[010] [8]. Az EBSD-technikával meghatározott pólusábrát az 4. ábrán mutatjuk be. A DIFT-eljárás során kialakult ultrafinom ferrites szövetszerkezetre mutat példát az 5a ábra, míg az 5b ábrán az EBSD-technikával meghatározott szemcseméret-eloszlás látható.

A szakirodalomból azt is megismertük, hogy a DIFT-eljárás során lezajló allotróp átalakulás során a ferrit és az átalakulás megkezdődése előtti ausztenit kristallit között az ún. Kurdjumov–Sachs-féle orientációs kapcsolat érvényesül [9].

Mielőtt ennek a megállapításnak a léces martenzit keletkezésével való összefüggésére utalnánk, egy érdekes lehetőségre hívjuk fel a figyelmet. Ha a szakirodalmi megállapítás megállja a helyét, akkor egy-egy kristalliton belül képződött ferrit kristallitoknak ugyanolyan orientációkapcsolatot kellene mutatniuk, mint amit a léces martenzites szövet vizsgálatkor tapasztaltunk. Ilyen mérések



■ 4. ábra. A nagy hőmérsékletű MF-technikával megmunkált C-Mn acél EBSD-technikával meghatározott pólusábrája [8] nyomán



■ 5. ábra. a) a DIFT-eljárás során kialakult szövetszerkezet fénymikroszkópos felvétele (maratás 3%-os Nital). b) az ultrafinom szemcseméretű minta EBSD-technikával meghatározott szemcseméret-eloszlása: (Number = a szemcsék száma; Grain size = szemcseméret)

végrehajtására lehetőséget látunk, hiszen az ausztenit krisztallitok határai speciális maratási technikával láthatóvá tehető, és egy-egy ausztenit krisztalliton belül jelenlévő ferrit krisztallitok textúrája SEM+EBSD-technikával meghatározható.

Ha a Kurdjumov–Sachs-féle orientációs kapcsolat adott esetben mégsem bizonyulna helytállóknak, ez a körülmény a DIFT-folyamat során lejátszódó, a  $\gamma \rightarrow \alpha$  kétfázisú területben lezajló változásokról adhat információt.

### 2.3. A léces martenzitre alapuló eljárás

Kézenfekvő lenne, ha a harmadik kutatási területnek a másik kettővel – elsősorban azonban a másodikkal – való kapcsolatát a Kurdjumov–Sachs-féle orientációs kapcsolatnak a léces martenzit és az alakítás hatására bekövetkező allotróp átalakulás folyamatában játszott szerepén keresztül érzékeltetnénk. Mégsem ezt az utat választjuk, hiszen a projekt egyik legfontosabb eredményét az a felismerés jelenti, hogy a CE = 0,4 karbon egyenértékű acél nagy hőmérsékletű edzésekor létrejövő léces martenzit diszlokációsűrűsége alapján telített, sőt túltelített állapotú. A léces martenzit telített, illetve túltelített állapotának felismerése a harmadik kutatási területet az elsővel és a másodikkal egyaránt szinaptikus kapcsolatba hozza.

Azt, hogy a léces martenzit  $10^{15}$  m<sup>-2</sup> diszlokációsűrűsége milyen mértékű egyenértékű alakváltozásnak felel meg, csak becsülni lehet, de ez az érték minden bizonnyal nagyobb, mint egy [10].

További új felismerést jelent a léces martenzites szövetű acél hidegalakításakor bekövetkező diszlokációsűrűség-csökkenés. Ennek a folyamatnak az értelmezéséhez nagymértékben hozzájárultak a diszlokációk jellegére vonatkozó röntgendiffrakciós profilanalízisből származó eredmények [11]. Egy 0,4 karbon egyenértékű acél nagy hőmérséklet-ről edzett, majd alakított és lágyított mintáinak röntgendiffrakciós profilanalízisének eredményeit a 2. táblázat mutatja.

A harmadik kutatási területhez kapcsolódó eredmények – a másik két területtel való kapcsolatrendszeren keresztül – megalapozottá teszik azt a kijelentést, hogy a szerkezeti acélok nagy hőmérsékletű edzése az IKA-eljárásokkal egyenértékű technológiai műveletnek tekinthető.

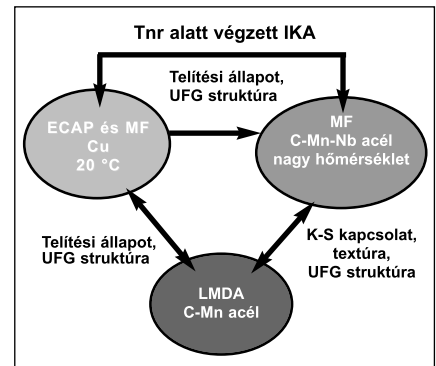
### 3. Összefoglalás

Az elmondottakon túlmenően a három kutatási terület között az is kapcsolatot teremt, hogy az ECAP-, az MF-, a DIFT- és az LMDA-eljárás egyaránt alkalmasnak bizonyult ultrafinom szemcseméretű fém anyagok előállítására. Ezt a kapcsolatrendszer szemlélteti a 6. ábra,

2. táblázat. Egy CE = 0,4 karbon egyenértékű szerkezeti acél edzett, majd alakított és utána lágyított állapotú mintáinak reális szerkezetére vonatkozó adatok

	$\langle x \rangle_a$ [nm]	$\rho$ [ $10^{15}$ m <sup>-2</sup> ]	$q$ (1,3 él $\langle q_{\text{elméleti}} \rangle < 2,7$ csavar)
6E	43 (±5)	9,1 (±1)	2
6EH	26 (±2)	8 (±1)	2
6EHL	70 (±6)	0,9 (±1)	2,44

A jelölések értelmezését lásd az 1. táblázatnál



■ 6. ábra. Az „idegsejtek” közötti kapcsolatrendszer bemutatató vázlat

amely szemléletesen mutatja, hogy az „idegsejtek” közötti szinaptikus kapcsolatot az ötvözetekben lejátszódó mechanizmusok jelentik.

A három kutatási terület közötti sokrétű kapcsolatrendszer feltárása teszi egységes egészzé a címben foglalt tárgyú kutatási területen végzett munkát, és teremt alapot az ultrafinom és/vagy nanoszemcsés tömbi, szerkezeti fém anyagok fejlesztésére irányuló célzott alap kutatáshoz.

Ezt az elképzelést a TÁMOP 4.2.2.-08/2008-0016 projekt befejezésekor, 2012 márciusában fogalmaztuk meg. Amint arról a lap olvasói már értesülhettek, a 2012. október 1-jén induló új TÁMOP-projektben – pontosabban annak első nyolc kutatási altémájában módunk van elképzeléseink megvalósítására.

### Köszönetnyilvánítás

Ez a munka a Dunaújvárosi Főiskolán Európai Unió támogatással folyt TÁMOP 4.2.2.-08/2008-0016 számú projekt keretében készült, ennek a cikknek a megírását a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027 számú „Nagy teljesítőképességű szerkezeti anyagok kutatása” című projekt tette lehetővé. Köszönjük a támogatást!

## Irodalom

- [1] Gonda V. – Bodnár V. – Molnár L. – Verő B. – Valenta L.: A könyöksajtolás elmélete és gyakorlata. BKL Kohászat, 145/1. 20–36. (2012)
- [2] Bereczki P. – Verő B. – Janó V.: Többtengelyű hidegalakítási kísérletek színrézzel. BKL Kohászat, 145/6. (2012)
- [3] Verő B.: A fizikai és matematikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban. BKL Kohászat, 145/1. 1–6 (2012)
- [4] Csanádi, T. – Chinh, N. Q. – Gubicza, J. – Langdon, T. G.: Plastic behavior of fcc metals over a wide range of strain: Macroscopic and microscopic descriptions and their relationship. Acta Materialia 59 (2011) pp. 2385–2391
- [5] Ungár T.: Duálfázisú ferrit-ausztenit acél minták valamint Cu-ECAP minta röntgen mérési adatainak és azok kiértékelésének részletes dokumentációja. ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai tanszék, Vizsgálati jegyzőkönyv, 2012 április
- [6] Bereczki P. – Verő B. – Fehér N. – Virág J.: 1050A jelű alumíniumötvözet szövetszerkezetének optimalizálása a meleghengelési technológia fizikai szimulációjával. XIV. Képlékenyalakító Konferencia, Miskolc, 2012, p. 165–173., ISBN 978-963-661-985-5
- [7] Személyes közlés: Réger Mihálytól és Bereczki Pétertől
- [8] Szabó P. J.: Intenzív alakítási és hőkezelési folyamatok mikroszerkezetre gyakorolt hatásának értelmezése visszaszórt elektron-diffrakcióval. MTA Doktori értekezés, 2013. június 20.
- [9] Kurdjumov, G. – Sachs, Z.: Über den Mechanismus der Strahlhartung. Zeitschrift für Physik, vol. 64 pp. 325-343, 1930.
- [10] Verő B. – Csepeli Zs. – Keve Z. – Szabados O. – Csizsár G.: A léces martenzitben alakítás és lágyítás hatására lejátszódó szövetszerkezeti változások. Előadasként elhangzott a VIII. Országos Anyagtudományi Konferencián és Kiállításon, Balatonkenese, 2011. október
- [11] Ungár T. – Csizsár G.: Melegen, hidegen hengerelt, edzett és hőkezelt állapotú mintalemezek vizsgálata. Vizsgálati jegyzőkönyv 2011. június, ELTE Anyagfizikai Tanszék

SZABÓ PÉTER JÁNOS – BERECKZI PÉTER

# Intenzív alakítási és hőkezelési folyamatok mikroszerkezetre gyakorolt hatásának értelmezése visszaszórt elektron-diffrakcióval

**Ultrafinom szemcseszerkezetű fémek egyik lehetséges előállítási módja az, hogy az anyagban nagy diszlokációsűrűséget hozunk létre, majd hőkezeliük. A diszlokációsűrűség értéke nagymértékben növelhető erőteljes képlékenyalakítással, vagy egyes esetekben nagy sebességű fázisátalakulással (ez utóbbi lehet például egy martenzites átalakulás). A kísérletek során erőteljes képlékenyalakítást értünk el kaliberhengelés-sel és többtengelyű kovácsolással, mindkét esetben többszörös alakítási ciklust alkalmazva, a nagy sebességű fázisátalakulást pedig C-Mn acélok edzésével valósítottuk meg. Az így előkészített minták megfelelő hőkezelése után ultrafinom szemcseszerkezetű anyaghoz jutottunk.**

**A szemcseméretet, a szemcsehatárok típusait, valamint a szemcsék belső deformáltságát visszaszórt elektron-diffrakciós vizsgálatokkal határoztuk meg.**

## Bevezetés

Az utóbbi években egyre több kutató foglalkozik annak vizsgálatával, hogy

hogyan lehetne ultrafinom szemcsés fémek anyagokat előállítani tömbi méretekben, olcsó kiindulási alapanyagokból. Az ilyen szerkezetű

fémek szilárdsági mutatói jelentősen jobbakként, mint a hagyományos anyagoké. A szemcseméret szerepét a Hall–Petch-egyenlet írja le [1,2]:

**Szabó Péter János** okleveles villamosmérnök, a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének egyetemi docense. 1995-ben PhD-fokozatot szerzett a nagyfelbontású röntgen vonalprofil-analízis témaköréből, 2013-ban elnyerte az MTA doktora címet. Fő kutatási területe az anyagok elektronmikroszkópos vizsgálata, ezen belül a visszaszórt elektron-diffrakció alkalmazása egyes fémteni folyamatok jellemzésére.

**Bereczki Péter** a BME Közlekedésmérnöki Karán végzett 2010-ben gépészmérnök szakon, járműgyártás és -javítás szakirányon okleveles gépészmérnök. Jelenleg a BME Pattantyús Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola ösztöndíjas doktorandusz hallgatójaként ultrafinom- és nanoszemcsés, tömbi ötvözetek fejlesztésével foglalkozik. Emellett a Dunaújvárosi Főiskola Műszaki Intézeténél tudományos segédmunkatársként a Gleeble 3800-as termomechanikus szimulátorral végez különböző technológiai szimulációkat és anyagvizsgálatokat.