

Roncsolásmentes kristálytani anizotrópia vizsgálata röntgendiffrakciós módszerrel

Sepsi Máté*, Benke Márton, Mertinger Valéria

Miskolci Egyetem Fémtechnológiai Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

*E-mail: femsepsi@gmail.com

Kulcsszavak: Roncsolásmentes, Kristálytani anizotrópia, Textúra, Röntgendiffrakció

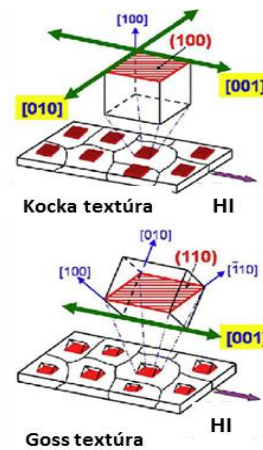
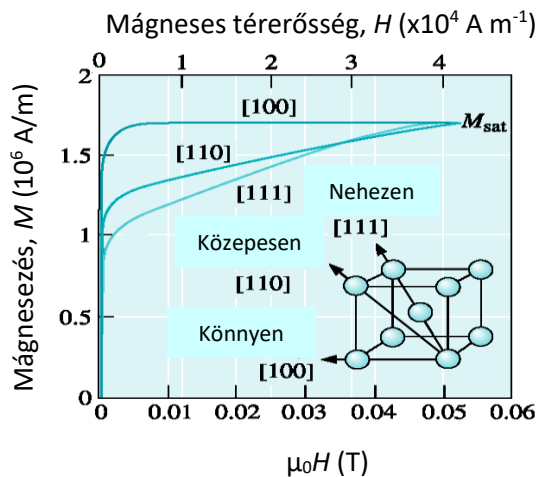
Összefoglaló

A természetben előforduló szimmetria jelenségét a szem információja alapján az emberi agy gyorsan rekonstruálja, de nehéz kvantitatív módon, matematikai eszközökkel leírni, jellemezni. A szimmetria szépségén túl a műszaki anyagtudományban, és a természeti tudományokban a különböző anyagokban fellépő szimmetriának, periodicitásnak sokszor nagyon fontos jelentősége van. A fémekben kialakuló kristálytani izotrópia vagy anizotrópia (textúra) a gyakorlati felhasználás szempontjából számos tulajdonságot meghatároz, mint például az alakíthatóságot, a mágneses tulajdonságokat, illetve az ok-okozati logikát megfordítva, a különböző technológiák (öntés, képlékenyalakítás, újrakristályosítás) a fémekben jellemző nyomot, textúrát alakítanak ki.

A Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia rendelkezik egy Euler-bölcsevel ellátott röntgendiffraktométerrel (Bruker D8 Advance), mely a textúra félkvantitatív (inverz pólusábra, pólusábra) és kvantitatív (ODF) jellemzésére konvencionális módon alkalmas. Mivel vizsgálat közben a mintát forgatni, mozgatni kell, ezért a vizsgálat korlátozza a mintageometria, mintaméret, amely erősen limitált, ami sok gyakorlati alkalmazásban egy nagyon lényeges szempont. Vagyis röntgendiffrakciós technikával textúra meghatározására eddig csak roncsolásos módon volt lehetőség. Korábban a Seuso leleteken végeztünk feszültség és textúra jellemzéseket. A textúra kvalitatív módon történő jellemzése és bemutatása nem eléggé meggyőző, publikálása nehézkes. Ezért meghatároztuk azokat a szükséges egyenleteket, amelyek lehetőséget biztosítanak a központ nélküli feszültségmérő diffraktométerrel történő vizsgálathoz, melynek eredménye alapján a pólusábra számítható, és így a különböző módszerek közti átjárhatóság megteremthető, és ami a legfontosabb, a textúravizsgálat mintakivágás nélkül, tehát roncsolás nélkül elvégezhető.

Bevezetés

Kristálytani textúrának nevezzük a polikristályos fémekben a kristályok orientációjának a véletlenszerűtől való eltérését (Bárczy & Fuchs, 1981). Az izotróp és anizotróp szerkezet alapvetően befolyásolja az anyag tulajdonságainak irányfüggését. Ha az anyag izotróp, a tulajdonságai (pl. rugalmassági modulus) minden irányban megegyeznek és a fizikai tulajdonságaik nem függenek az iránytól. Az anizotróp szerkezetű anyag tulajdonságai is anizotrópok lesznek, kitüntetett gyakorlati jelentősége a mechanikai és a mágneses tulajdonságoknak van. Az 1. ÁBRA mágnesezési irányfüggésre, míg az 1. Táblázat rugalmassági modulus függőségre mutat példát.



1. ÁBRA TRANSZFORMÁTOR LEMEZEK MÁGNEZESEZÉSI GÖRBÉJÉNEK FÜGGÉSE A KRISTÁLYTANI IRÁNYTÓL (CALLISTER, 2007) ÉS A HOZZÁ TARTOZÓ NEVEZETES GOSS ÉS KOCKA TEXTÚRÁK (RAABE, 2016)

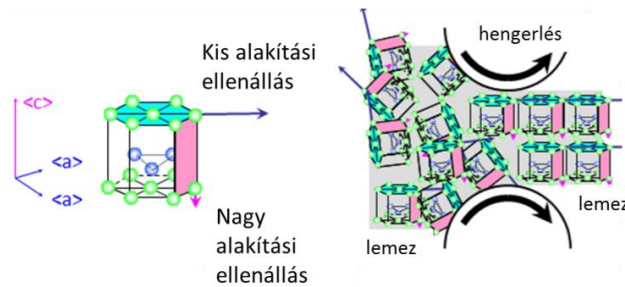
1. TÁBLÁZAT TISZTA FÉMEK RUGALMASSÁGI MODULUS ÉRTÉKÉNEK IRÁNYFÜGGÉSE (CALLISTER, 2007)

Fém	Rugalmassági modulus, GPa		
	[100]	[110]	[111]
Al	63,7	72,6	76,1
Cu	66,7	130,3	191,1
Fe	125	210,5	272,7

Fémeknél a kristálytani anizotrópia képlékenyalakításnál, újrakristályosodásnál és öntésnél figyelhető meg. A textúrák jellege eltérő, ezért megkülönböztetünk alakítási, újrakristályosodási és öntési textúrát. Az öntési textúra alakulását a hőelvonás iránya, illetve a csíráképződési feltételek szabják meg, hogy a szilárd fázis szemcséi milyen irányban növekednek. Az alakítási textúra létrejöttében nagyon fontos szerepet játszik a diszlokációs csúszás, ami a fémekben az atomsíkok elmozdulását, valamint a szemcsék alakváltozását eredményezi (Kocks, Tomé, & Weng, 1998) (Engler & Randle, 2010) (Suwas & Ray, 2014). A diszlokáció csúszása okozta atomsík elmozdulás kitüntetett rácssíkon kitüntetett irányban zajlik. A fentebb említettek alapján, ha a fémeket alakítjuk, a kristályok a számukra kedvező pozícióba fordulnak, így anizotróp struktúra jön létre (2. ÁBRA). A kristálytani textúra egyik leglátványosabb hatása a mélyhúzásnál figyelhető meg, itt a félkész termék vastagságát meleg vagy hideg hengerléssel érik el (pl. lemez). A félkész terméket erős alakítási textúra jellemzi, emiatt erős az anizotrópiája, ami a mélyhúzásnál fűledést okoz (3. ÁBRA). Az erős alakítási textúra csökkentése érdekében alkalmazhatunk lágyító hőkezeléseket, a lágyító hőkezelések során azonban egy újrakristályosodási textúra létrejötté figyelhető meg. Az újrakristályosodott szerkezet is anizotróp szerkezetet fog eredményezni, mivel az újrakristályosodás is kitüntetett síkok mentén fog végbe menni. Minimális fűledés az alakítási és újrakristályosodási textúra kombinációjával érhető el. Az 1. ÁBRA transzformátor lemezénél mutatott nagy gyakorlati jelentőséggel bíró Goss orientáció is melegalakítással valósítható meg. Annak ellenére, hogy az elmúlt 50 évben egy intenzíven kutatott terület volt ezen textúra kialakulása, még a mai napig is vannak nyitott kérdések (Dorner, Zaefferer, Lahn, & Raabe, 2006).

A kristálytani anizotrópiát gyakran összekeverik a szemcsealak (morfológiai) anizotrópiával, mely szintén jellemzően hidegalakításkor alakul ki és mikroszkópi képeken is jól láthatóvá tehető. Vannak olyan metallográfiai módszerek, amelyek a kristálytani anizotrópiát és a morfológiai anizotrópiát próbálják jellemezni. Ilyen módszer például alumínium ötvözeteknél

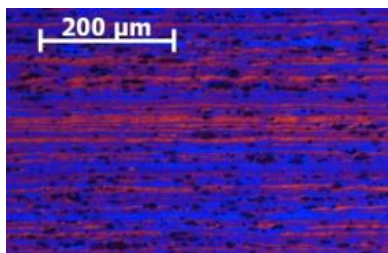
alkalmazott Barker színes maratási technika, amivel megmarva a darabokat a különböző irányítottágú szemcséken különböző vastagságú csapadék képződik, melyet polarizált fényben különböző színűnek látunk. Erre mutat példát az egyik mintadarabunkról a 4. ÁBRA. Az azonos orientációjú szemcsék azonos színűek.



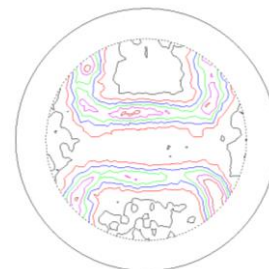
2. ÁBRA MAGNÉZIUM HENGERLÉSI TEXTÚRÁJÁNAK KIALAKULÁSA (SUZUKI, XINSHENG, & YUASA, 2013)



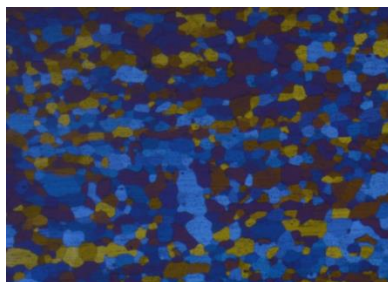
3. ÁBRA FÜLESEDÉS MEGJELENÉS MÉLYHÚZÁSNÁL (SAJÁT FELVÉTEL)



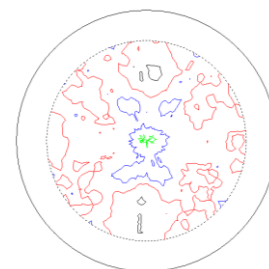
Alumínium hengerlési szövete a hengerlési irányban Barker maratási technikával



Pólusábra: alumínium {200} hengerlési textúra



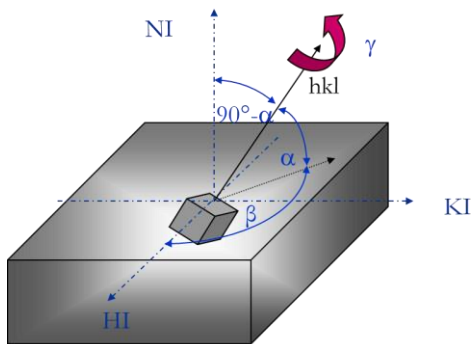
Alumínium újrakristályosodási szövete a hengerlési irányban Barker maratási technikával



Pólusábra: alumínium {200} újrakristályosodási textúra

4. ÁBRA TEXTÚRA JELLEMZÉSE ALUMÍNIUMBAN (SEPSI & KÁRPÁTI, 2015)

Azonban a Barker maratás által nyújtott kvalitatív információ nem bizonyul elégségesnek azoknál a problémáknál, ahol a kristálytani textúrának jelentős szerepe van, ilyenkor kvantitatív módon kell meghatározni azt. Erre egy lehetséges mód, amivel kísérletet tehetünk:

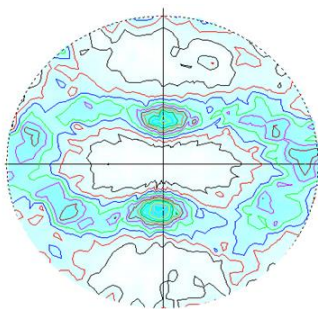


5. ÁBRA ELEMI CELLA POZÍCIÓJÁNAK MEGADÁSA HENGERELT LEMEZBEN (KRAWITZ, 2001)

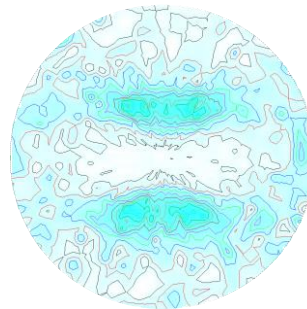
Meg kell határoznunk egy kötött koordináta rendszert, amiben az egyes szemcsék orientációját értelmezni tudjuk. Ezt a koordináta rendszert célszerű a mintához rendelni, mégpedig úgy, hogy a koordináta rendszer tengelyei egybeessenek a minta jellemző irányaival. Így egy hengerelt mintánál értelmezhető hengerlési irány (HI), kereszt irány (KI), és normál irány (NI). Ebben a kötött koordináta rendszerben egy szemcse orientációját úgy értelmezzük, hogy a szemcsét annak egy elemi cellájával helyettesítjük, és ezen elemi cella valamely (hkl) síkjának normálisát jellemezzük a 5. ÁBRA szerinti módon az α , β és γ

szögek segítségével.

Az α szög nem más, mint a (hkl) sík normálisának a minta NI-val bezárt ($90^\circ - \alpha$) szög komplementer szöge, a β szög a (hkl) sík normálisának a HI és KI által meghatározott síkban HI-nyal bezárt szöge, valamint γ szög, ami a hkl sík normálisa körüli forgatásként értelmezhető. Amennyiben polikristályos az anyagunk, ugyan ezen paraméterekkel jellemezhető valamennyi szemcséje. Ezen értelmezés szerint elviekben egy polikristályos anyag valamennyi kristályának orientációja megadható a $T^*(\alpha, \beta, \gamma, hkl)$ sűrűségfüggvénnyel. Azonban a gyakorlatban megvalósítható mérés technikákkal ezen értelmezés kiegészítésre szorul. Nem véletlen az, hogy ez a megközelítés a kristály orientációját, annak egy elemi cellájának valamely síkjával és annak normálisával jellemzi. A következő fejezetben ismertetett mérés technika a diffrakció jelenségén alapul, az ott részletezett okok miatt, ezzel a technikával ezen (hkl) síkok, egészen pontosan $\{hkl\}$ síkrendszer térbeli eloszlása mérhető. Azonban a gyakorlati mérés technikával csak az α és β szögek határozhatók meg, a γ szög szerinti elfordulás egy bizonytalansággként jelentkezik. Így azonban, a már ismertetett $T^*(\alpha, \beta, \gamma, hkl)$ függvény szerinti ábrázolási mód nem alkalmazható. Helyette $T^*(\alpha, \beta, hkl)$ ábrázolási módot választhatunk, ami egy félkvantitatív textúra jellemzés, az így kapott függvényünk pedig a pólusábra, mely a mérnöki gyakorlatban talán a leggyakrabban alkalmazott anizotrópia jellemzési mód. A 4. ÁBRA a hengerelt és az újrakristályosodott alumínium lemez $\{200\}$ síkrendszeréről készült pólusábráját mutatja. Ezzel szemben a 6. ÁBRA hengerelt alumínium és ezüst lemez $\{222\}$ pólusábráját szemlélteti. Jól látható, hogy a pólusábra jellege különböző anyag, de azonos kristályszerkezet és technológia esetén nagyon hasonló, s az egyes síksorozatok jellegzetes képet mutatnak. A pólusábra konvencionális felvétele során a mintát döntjük és forgatjuk és detektáljuk az adott síksorozatról diffraktált interferencia függvény intenzitás változását.



a)



b)

6. ÁBRA HENGERELT ALUMÍNIMUM (A) ÉS EZÜST (B) LEMEZ JELLEMZŐ PÓLUSÁBRÁJA A $\{222\}$ SÍKSOROZATRÓL (SAJÁT KONVENCIONÁLIS FELVÉTEL)

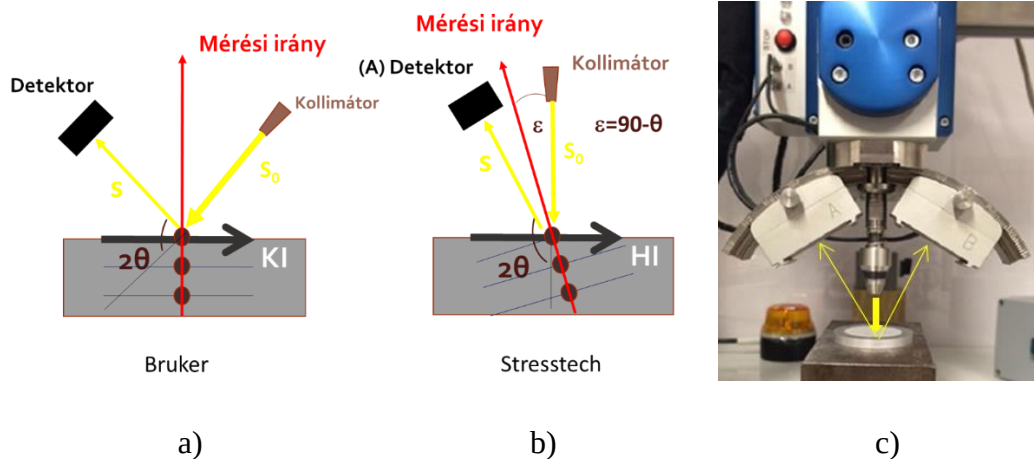
Teljes Pólusábra felvételére alkalmas textúra mérési módszer kidolgozása és validálása központ nélküli röntgendiffraktométerre különböző módokban

A hordozható feszültségmérő diffraktométerek központ nélküli diffraktométerek, vagyis nem a minta mozgását, hanem a berendezés mozgását valósítják meg. Ez adta az ötletet, hogy ezt a berendezés-családot alkalmazzuk anizotrópia vizsgálatra is anélkül, hogy roncsolnánk a darabot. Hogy a két módszer közötti átjárás miért nem nyilvánvaló és triviális, azt a 7. ÁBRA mutatja. Azzal, hogy a központ nélküli diffraktométernél a sugár merőlegesen esik a minta felületére, a mért síksorozat normálisa (ami nem más, mint a mérési irány) a minta felületének normálisával ε szöget zár be. Konvencionális diffraktométernél ugyanazon Miller-indexű síksorozatok közül azokat fogjuk detektálni, amelyek normálisa megegyezik a minta felületének normálisával. Vagyis a két mérés során nem azonos pozícióban lévő síksorozatokat detektálunk, így a két módszerrel meghatározott térbeli eloszlásfüggvény különbözni fog. Kutatómunkánkban azt tűztük ki célul, hogy meghatározzuk azokat az összefüggéseket, amelyek segítségével elvégezhető a központ nélküli diffraktométerrel a mérés ugyanazon pozícióban lévő síksorozatok detektálásával, mint konvencionális mérés esetében.

Hagyományos textúra mérés laboratórium környezetben megvalósítható módszer, melynek, a legfőbb korlátja a minta méret és geometria. Ez pedig a goniométer rögzített mivoltából, és az Euler-bölcső befoglaló méreteiből fakad. A maradó feszültség mérésére kifejlesztett röntgen diffraktométereknél az egyik legfőbb konstrukciós szempont, hogy a változatos geometriájú és méretű alkatrészeket akár ipari körülmények között is roncsolásmentesen (minta kivágás nélkül) lehessen velük vizsgálni.

Az Ω módra kidolgozott módszer

Ha megvizsgáljuk a 7. ÁBRA szerinti sugármenetet, akkor a következőkre lehetünk figyelmesek. A konvencionális X mód során $\varphi=0^\circ$ forgatás mellett a X tengely és a KI egybeesnek, ezért, ha e tengelyek mentén döntünk, a mérési irányunk a HI mentén változik. Ahhoz, hogy a mérési irány az általunk használt központ nélküli diffraktométer Ω módjában is a HI-ba változzon, a mintánkat úgy kell pozícionálni, hogy a HI és az Ω módban felhelyezett detektorok síkja egy síkba essen.



7. ÁBRA, SUGÁRMENET A) KONVENCIONÁLIS (BRUKER) ÉS B) A KÖZPONT NÉLKÜLI (STRESSTECH) GONIOMÉTERBEN, Ω MÓDBAN (SEMATIKUS) ÉS A C) STRESSTECH GONIOMÉTERBEN Ω MÓDBAN (FOTÓ)

Ekkor a mérésünket valóban ugyanabban a síkban hajtjuk végre. Azonban ezen feltétel teljesítése még nem elegendő, ugyanis -amint azt a 7. ÁBRA szemlélteti- $\omega'=0^\circ$ döntés mellett

ε értékkel tér el a mérés iránya a $\chi=0^\circ$ döntéshez képesti mérés iránytól, ami a konvencionális konfiguráció 0 döntési pozíciójának felel meg. Fontos azonban megemlíteni, hogy maradófeszültség mérésére kifejlesztett berendezések Ω módjának sugármenete nem azonos a konvencionális diffraktométerek Ω módjának sugármenetével. A konvencionális berendezések esetében ω a primér nyaláb és a minta felülete közötti szög, míg jelen esetben ω' a minta felületének normálisa és a primer röntgennyaláb által bezárt szög. Itt $\omega'=0^\circ$ a kiinduló állapot, és ekkor a mérés irány a minta normálisával ε szöget zár be. Következésképpen, szoftveresen is ehhez a kiinduló állapothoz képest lehet megadni a „Tilt Angles” név alatt a döntés szögeket pozitív és negatív tartományban. Az ismertett ε szöget a Bragg-szögből származtatjuk. Mivel a primer és diffraktált nyaláb által bezárt szög a 2θ komplementer szöge így a

$$\varepsilon = (180 - 2\theta)/2 \quad (1)$$

szerint alakul. Ezen összefüggés ismeretében egy tetszőleges χ_i szög a

$$\chi_i = \pm\omega'_i \pm \varepsilon \quad (2)$$

szerint számolható, annak függvényében, hogy a diffraktált nyaláb hol helyezkedik el a primerhez képest. A 7. ÁBRA C) képen jól látszik, hogy a G3R diffraktométeren kettő detektor van. Mérés közben lehetőségünk van csak az egyik, vagy mindkét detektort aktívvá tenni. Az Ω mód esetén a mérési irányok eltérők (egymás inverzei) a két detektorra. Amennyiben az „A” detektor által mért reflexiót vizsgáljuk, úgy az ε előjele negatív, ha a „B” detektorét, akkor az ε a pozitív, az ω' pozitív és negatív előjelel egyaránt rendelkezhet egy mérés során.

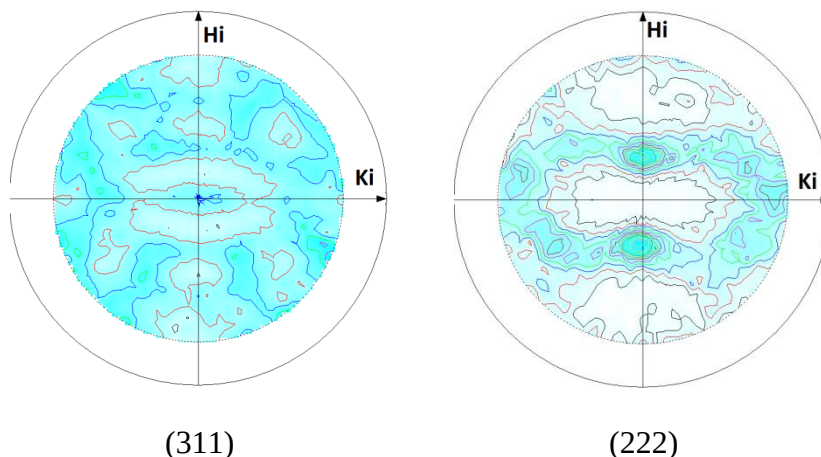
Ezen összefüggések elegendőnek bizonyultak, hogy bizonyítsuk feltevésünket, mely szerint a központ nélküli maradó feszültség mérésére kifejlesztett berendezéssel is vizsgálhatók ugyanazon mérési irányok, mint a konvencionális berendezésekkel, és validáló χ metszeteket készíthettünk. Méréseinket először a Bruker D8 Advance központos diffraktométerrel kezdtük, és kimértük azokat a reflexiókhoz tartozó pólusábrákat, mely reflexiót a Xstress G3R is lát. Ezeknek a mérések a körülményeit és eredményét a 8. ÁBRA foglalja össze.

Vizsgáló berendezés	Bruker D8 Advance
Vizsgált minta Jelölése:	H17
Anyaga:	Alumínium
Termomechanikus kezelés állapota:	Hidegen hengerelt
Bragg-pozíció (311); (222):	94,2°; 99,8°
Alkalmazott sugárforrás:	Co röntgen cső
Gyorsító feszültség; fűtőáram:	40 kV; 40 mA
Kollimátor:	Bragg-szögtől függ 20*(1-3) mm
Expozíciós idő:	5 s

Ezt követően kidolgoztuk azt az algoritmust, amivel a teljes pólusábra kimérhető Ω módban és a mérés során keletkezett nagymennyiségű adat (kb. 1000 db mérési pont) értelmezhető. A mérés körülményeit és az első központ nélküli diffraktométerrel meghatározott pólusábrát mutatja a 9. ÁBRA. Az ábrán látható, hogy a két pólusábra információ tartalma azonos, és hogy a feltételezésünk, mely szerint a központ nélküli diffraktométerrel lehet pólusábrát meghatározni, igaznak bizonyult.

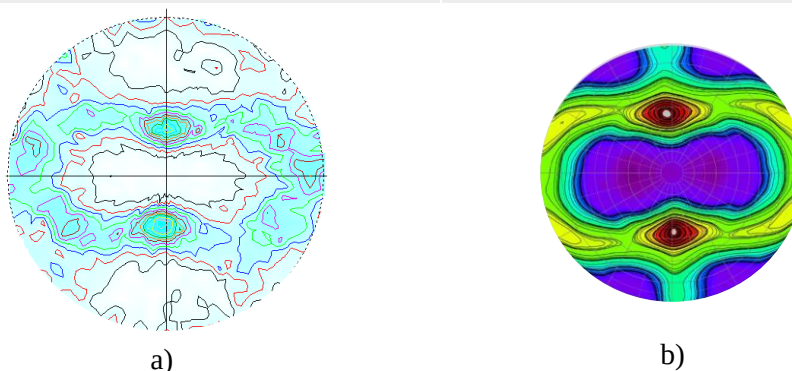
A roncsolásmentes jelleget hengerelt alumínium táblalemezen bizonyítottuk be. Eredendően a lemezek darabolás előtti maradó feszültségállapotát vizsgáltuk. Ez tipikusan az az eset volt, hogy nem lehetett mintadarabot vágni a lemezből. (10. ÁBRA). A vizsgálat körülményeit és a (222) pólusábrát a 11. ÁBRA mutatja. Jól látható, hogy a feszültségtelenítő hőkezelés hatására az alakított textúra jelleg nem változott meg, vagyis az újrakristályosodási folyamat nem indult el a lemezben. A feszültségmérések igazolták a feszültségmentes állapotot. Ezzel a

vizsgálattal kétséget kizáróan bizonyítottuk, hogy a kidolgozott módszer alkalmas roncsolásmentes pólusábra felvételére.



8. ÁBRA KONVENCIONÁLISAN MÉRT HIDEGEN ALAKÍTOTT ALUMÍNIUM PÓLUSÁBRÁI A HANGERLÉSI ÉS A KERESZTIRÁNNYAL

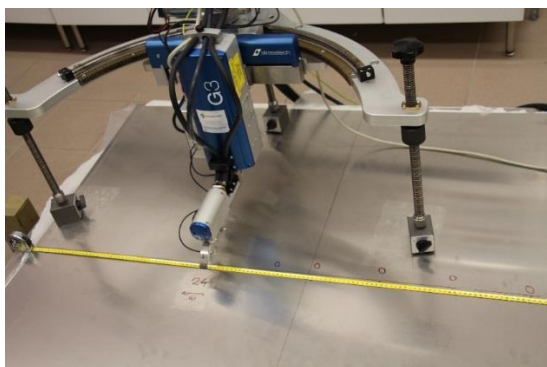
Vizsgáló berendezés	Xstress G3R
Vizsgált minta Jelölése:	H17
Anyaga:	Alumínium
Termomechanikus kezelés állapota:	Hidegen hengerelt
Bragg-pozíció (222):	156,19°
Alkalmazott sugárforrás:	Cr röntgen cső
Gyorsító feszültség; fűtőáram:	30 kV; 8 mA
Kollimátor:	5 mm
Expozíciós idő:	3 s



9. ÁBRA A) KONVENCIONÁLIS ÉS B) AZ ELSŐ, SAJÁT MÓDSZERREL, KÖZPONT NÉLKÜLI DIFFRAKTOMÉTERREL Ω MÓDBAN MEGHATÁROZOTT, ALAKÍTOTT ALUMÍNIUM (222) PÓLUSÁBRÁJA

Összefoglalás

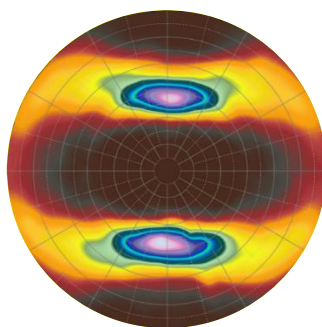
A roncsolás mentes XRD vizsgálótechnika alkalmazása közben fogalmazódott meg bennünk, hogy ezt, az alapvetően teljesen különböző kialakítású és sugármenetű berendezést, ha alkalmassá lehetne tenni textúra vizsgálatra, akkor a kristálytani anizotrópia vizsgálat elvégezhető lenne roncsolás nélkül is, ezáltal kiterjeszthető volna az archeometria tudományterületére, valamint az ipar számára is új lehetőségek nyílnának a fejlesztés és minőségbiztosítás tekintetében. Feltártuk, hogy a hagyományos központos mérés technikával meghatározott pólusábra rekonstruálható, így a két különböző sugármenet között a kapcsolat



10. ÁBRA A) KÖZPONT NÉLKÜLI
DIFFRAKMÉTER MÉRÉS KÖZBEN B)
MÉRŐFEJ Ω ELRENDEZÉSÉBEN, C) MÉRŐFEJ
A SAJÁT GYÁRTÁSÚ RÖVIDÍTETT
DETEKTOR TARTÓ KARRAL

megteremthető. Jelenlegi munkánkban ismertettük a három különböző goniométeres technika kivitelezhetőségét, és figyelembe véve az általunk használt berendezések konstrukciós viszonyait, meghatároztuk azon matematikai összefüggéseket, melyekkel a maradó feszültség mérésére tervezett központnélküli röntgendiffraktométerekkel a pólusára mérés megvalósítható. Összehasonlító méréseket végeztünk a konvencionális textúra mérést megvalósító központos Bruker D8 Advance típusú berendezéssel és a központ nélkül Xstress G3R típusú berendezéssel, mellyel bizonyítottuk a kidolgozott összefüggések helyes voltát, így a textúra jellemzésének skáláját kiterjesztve a mm feletti tartományra.

Vizsgáló berendezés	Xstress G3R
Vizsgált minta Jelölése:	H17
Anyaga:	Alumínium
Termomechanikus kezelés állapota:	Hidegen hengerelt
Bragg-pozíció (222):	156,19°
Alkalmazott sugárforrás:	Cr röntgen cső
Gyorsító feszültség; fűtőáram:	30 kV; 8 mA
Kollimátor:	5 mm
Expozíciós idő:	3 s



11. ÁBRA KÖZPONT NÉLKÜLI DIFFRAKMÉTERREL RONCSOLÁS MENTESEN MÉRT
FESZÜLTÉGTELENÍTETT ALUMÍNIUM LEMEZ (222) PÓLUSÁBRÁJA

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka az **OTKA 119566** projekt támogatásával, valamint



AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK

MINISZTERIUMA ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

Hivatkozások

Bárczy, P., & Fuchs, E. (1981). *Metallográfia I.* Budapest: Tankönyvkiadó.

- Callister, W. D. (2007). *Material Science and Engineering, an Introduction*. USA: John Wiley & Sons.
- Dorner, D., Zaefferer, S., Lahn, L., & Raabe, D. (2006). Overview of Microstructure and Microtexture Development in Grain-oriented Silicon Steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 183–186.
- Engler, O., & Randle, V. (2010). *Introduction to texture analysis*. CRC Press.
- Kocks, U. F., Tomé, C. N., & Weng, H. R. (1998). *Texture and anisotropy*. UK: Cambridge University Press.
- Krawitz, A. D. (2001). *Introduction to Diffraction in Materials Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Raabe, D. (2016). <http://www.dierk-raabe.com/>. Forrás: <http://www.dierk-raabe.com/>
- Sepsi, M., & Kárpáti, V. (2015). Kristálytani anizotrópia meghatározásának röntgendiffrakciós módszerei. *TDK dolgozat*. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar.
- Suwas, S., & Ray, K. R. (2014). *Crystallographic Texture of Materials*. London: Springer-Verlag.
- Suzuki, K., Xinsheng, H., & Yuasa, M. (2013. 03 15). http://www.aist.go.jp/index_en.html. (AIST)