

## Kereszthengerelt nióbbium nem konvencionális, roncsolásmentes textúra vizsgálata

Sepsi Máté\*, Hlavács Adrienn, Benke Márton, Mertinger Valéria

<sup>1</sup>Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország

\*Levelező szerző: femsepsi@uni-miskolc.hu

### Absztrakt

Különböző mértékű fogyással kereszthengerelt, nagytisztaságú nióbbium roncsolásmentes textúra vizsgálatát mutatjuk be. A kereszthengerlés célja a nióbbium mélyhúzzhatóságának javítása volt. A roncsolásmentes textúra vizsgálat során a különböző mértékig alakváltozott lemezek {110} {200} és {310} pólusábráit határoztuk meg robotkarra implementált központnélküli röntgendiffraktométer segítségével CHI módban. A mért eredményeket konvencionális, Euler bñlcsővel rendelkező röntgendiffraktométerrel felvett pólusábrákkal validáltuk. Kísérletileg bebizonyítottuk, hogy a központnélküli diffraktométer CHI módban is alkalmas pólusábra felvételére, mivel a kapott eredmények a konvencionális módon felvett pólusábrákkal azonos eredményt adtak.

**Kulcsszavak:** roncsolásmentes textúra vizsgálat, röntgendiffrakció, kereszthengerlés, nióbbium

### 1. Bevezetés

Kristálytani anizotrópiának, másnéven textúrának nevezzük a polikristályos fémekben a kristályok orientációjának a véletlenszerűtől való eltérését [1]. A kristálytani anizotrópia kérdésköre mind a természettudományokban, mind a mérnöki, ipari gyakorlatban rendkívül nagy jelentőséggel bír. A különféle szilárd anyagok mechanikai és funkcionális tulajdonságainak irányfüggése visszavezethető a kristálytani anizotrópiára, aminek tudatos manipulálása már az iparban is elengedhetetlen. A textúra kialakulásának az oka polikristályos fémeknél a képlékenyalakítás, az újra-kristályosodás és az öntés, és mivel a textúrák jellege azok okainak megfelelően eltérő, ezért megkülönböztetünk alakítási, újra-

kristályosodási és öntési textúrát. Az öntési textúra alakulását a hőelvonás iránya, illetve a csíráképződési feltételek szabják meg, azáltal, 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 [1-3]. A diszlokáció csúszása okozta atomsík elmozdulás kitüntetett rácssíkon, kitüntetett irányban zajlik, ami jellemzően az atomokkal legsűrűbb sík és irány. A fentebb említettek alapján, ha a fémot alakítjuk, a kristályok a számukra kedvező pozícióba fordulnak, így anizotrópiát okozó, kristályorientáció jön létre. A kristálytani textúra egyik leglátványosabb hatása a mélyhúzásnál

jelentkezik. A félkész terméket, amely vastagságát meleg vagy hideg hengerléssel érik el erős alakítási textúra jellemzi, emiatt erős az anizotrópiája, amely mélyhúzásnál fülesedést, erőteljesen irányfüggő alakváltozást okoz (1.Ábra).



1.Ábra Fülesedés kialakulása mélyhúzás során.

Az erős textúra csökkentése érdekében alkalmazhatunk lágyító hőkezeléseket, azonban a lágyító hőkezelések során számolni kell az újrakristályosodási textúra létrejöttével. Az újrakristályosodott szerkezet is anizotróp lesz, mivel az újrakristályosodás is kitüntetett síkok mentén fog végbe menni. Ezért minimális fülesedést az alakítási és újrakristályosodási textúra kombinációjával, vagy nem egyirányú alakítással valósíthatunk meg.

Egyirányú hengerlés esetén sík alakváltozást feltételezünk, ami azt jelenti, hogy a lemez vastagsága szélesedés nélkül csökken. A lemez ortorombos szimmetriával rendelkezik, ami azt jelenti, hogy a hengerlés kereszt és normál irányú tengelye körül kétfogású szimmetria alakul ki. Kereszthengerlés esetén a lemezt a normál irányú tengelye körül  $90^\circ\text{C}$ -kal elforgatjuk az egyes szúrások közben. Ilyenkor a lemez tetragonális szimmetriával rendelkezik, vagyis a normál irány körül 4 fogású szimmetria alakul ki. Ilyen módon kereszthengerléssel csökkenthető a síkbeli anizotrópia mértéke [4]. Az anizotrópia csökkenését számos anyag esetében használták ki. Li és társai [5], valamint Tang és társai [6] magnézium esetében tudtak közel véletlenszerű textúrát létrehozni, kis fülesedéssel. Huh és társai [7] alumínium ötvözet esetén a kocka textúra erősödésének gátlására használták. Wronsky és társai [8] ferrites acélon viszont a képlékeny anizotrópia növekedését figyelték meg kereszthengerlés hatására.

Jelen kutatómunkánkban nagy tisztaságú nióbium estén alkalmaztuk a kereszthengerlést. A kutatómunka a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kara és genfi székhelyű Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN) közti együttműködés keretében történt, ahol a nióbium mélyhúzó tulajdonságait vizsgáltuk [9,10]. A nióbium az új, nagy össz sugárzású (luminozitású) Hadron ütköztető részét képező rádiófrekvenciás üregek alapanyagául szolgál. Az alapanyag rendkívül drága, ezért a különböző módon hengerelt lemezek roncsolásmentes textúra vizsgálata nagy előnyt élvez.

A textúra jellemzésére számos módszer létezik. Gyakran alkalmazott eljárás a visszaszórt elektron diffrakció (EBSD), ami néhány  $1000\ \mu\text{m}^3$ -es térfogatról ad információt [11]. Az ettől nagyobb térfogatra kiterjedő módszer a röntgendiffrakción alapuló pólusábra jellemzés, ami egy bizonyos Miller-indexű síksorozat normálisának térbeli eloszlását szemlélteti, és nem a kristályok orientációját [12]. Ez a fajta jellemzési mód könnyen értelmezhető, a termikus, valamint mechanikus hatások jellemző nyomot hagynak a pólusábrán. Azonban, ha teljesebb információra van szükségünk (pl. a textúra-komponensek térfogat hányadaira), akkor a textúra teljes kvantitatív jellemzését, az ODF-et (Orientation Distribution Function) [3], azaz az orientációs sűrűség függvényt kell meghatározni. Mind az EBSD mind a konvencionális röntgendiffrakciós textúra jellemzési módok megfelelő mintelőkészítést igényelnek, így azokat roncsolás mentesen nem lehet végrehajtani. Az elmúlt években szabadalmat nyújtottunk be központ nélküli diffraktométerek anizotrópia vizsgálati eljárására, módosított PSI módban [13]. A röntgendiffrakciós technikában a goniométer és a vizsgált minta egymáshoz képesti mozgását tekintve három különböző módszert különböztethetünk meg, a PSI vagy CHI módot, a módosított PSI módot, és az OMEGA módot [14]. Ezek az elnevezések a minta síkjához rögzített koordináta rendszer tengelyei mentén történő döntést hívatottak

szimbolizálni. Korábbi munkáinkban megmutattuk, hogy a módosított PSI és OMEGA módokkal központnélküli diffraktómeter alkalmazásával pólusára meghatározható különböző alkalmazási területeken [15-18]. Jelen kutatómunkánkban megmutatjuk, hogy a robotkarra implementált központnélküli diffraktómeterrel CHI módban végezhető textúra vizsgálat, és az így kapott, különböző fogyással kereszthengerezelt nióbbium lemez pólusábráit összevetjük a konvencionális módszerrel felvett pólusábrákkal.

## 2. Vizsgálati módszer és anyag

A vizsgálathoz a nagytisztaságú 4 mm vastag nióbbium lemezt a CERN bocsátotta rendelkezésünkre. A szennyezőanyagok összetételét az 1. Táblázat mutatja.

1. Táblázat A vizsgált nióbbium szennyezőinek összetétele [ppm]

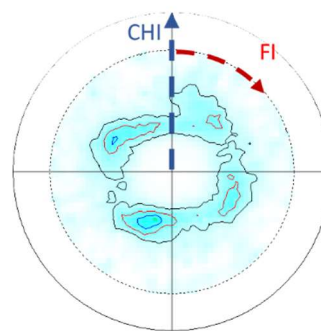
Ta	Zr	Fe	Si	W	Ni	Mo
300	5	5	10	<5	<5	<5
Hf	Ti	Cr+Co	H	N	O	C
10	<5	<10	1	8	7	10

Vízszintes vágással 120x120x4 mm méretű próbatestek lettek kimunkálva, majd az intézetünkben lévő Von Roll hengerállványon 10%, 20%, 30% és 50%-os vastagság csökkenéssel történt a kereszthengerezés, az alakításnak megfelelően 2, 4, 6 és 10 szűrás alkalmazásával. Minden egyes szűrást követően a lemez 90°-os fordítása után került a következő szűrásba.

A hengerezést követően végeztük el a roncsolásmentes textúra vizsgálatokat, majd a funkcionalitás vizsgálatokból megmaradt próbatesteken a roncsolásos textúra vizsgálatokat. A konvencionális mérést Euler bölcsovel felszerelt Bruker D8 Advance típusú berendezéssel végeztük. Az alkalmazott sugárforrás Co volt, a fókuszfolt 20 mm-es vonalfókusz. A defókuszálási korrekció ferrit poron végeztük. A hiányzó pólusok számításához a berendezés TexEval szoftverét használtuk triklin szimmetriát feltételezve. Az

{110}, {200} és a {211} pólusábrák felvétele CHI 0-70° és FI 0-360° között történt (2. Ábra).

A roncsolásmentes textúra vizsgálatot a Miskolci Egyetem 3D Laboratóriumában lévő Stresstech Xstress központnélküli robot diffraktómeterrel végeztük el, amelyhez a berendezés maradék ausztenit vizsgálatra kifejlesztett detektortartó ívét használtuk. Ebben az esetben a sugármenet pontosan megegyezik a konvencionális és a nem konvencionális berendezésben, azonban a robotot meg kell tanítani a megfelelő mozgások elvégzésére (3.-5. Ábrák). A két berendezésben eltérő a mérhető Bragg szög tartománya, a központ nélküli berendezésnél ez szűkebb. Ezért itt a {220}, {400} és a {310} síksorozatokat tudtuk megmérni. Kockarácsú anyag esetén a {400} és a {200}, valamint az {110} és a {220} síksorozatok párhuzamosak, így azok összehasonlíthatók, a kétféle pólusára azonos információt kell hordozzon. A konvencionális berendezésben a három pólusára mérését követően lehetőség van további pólusábrák kiszámítására az ODF szintézist követően. A két módszer összehasonlítása érdekében ezért kiszámoltuk a {310} pólusábrát.



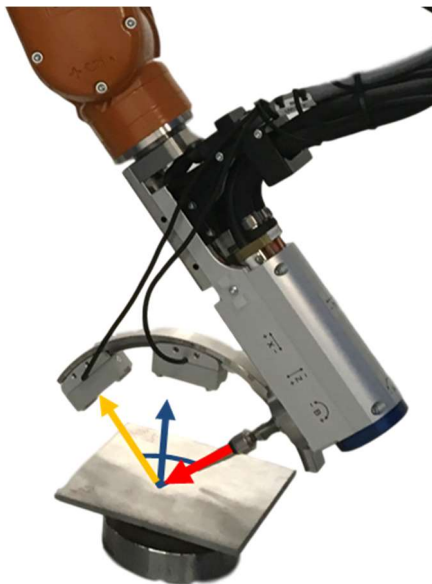
2. Ábra A CHI és FI szög értelmezése pólusábrán



3.Ábra A robot diffraktométer textúra mérés közben

A központnélküli berendezésben CHI maximálisan 60°, a FI pedig 360° értéket vehetett fel. A vizsgálat során Cu röntgensugárzást, 5 mm átmérőjű kollimátort és helyzetérzékeny vonaldetektorokat használtunk. A pólusára szerkesztéséhez az interferencia függvény görbe alatti területét (I-integrál intenzitás) használtuk a trapéz módszer alkalmazásával, mely az illesztett függvény intenzitás maximumának ( $I_{max}$ ) és a félérték szélességének (FWHM) az ismeretében a következő módon számolható [1]:

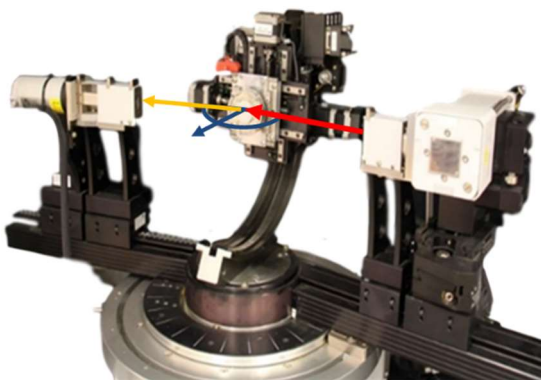
$$I = I_{max} \times FWHM / 0,937415 \quad (1)$$



4.Ábra Sugármenet a központ nélküli diffraktométerben; piros nyíl: primer nyaláb, sárga nyíl: szórt nyaláb, kék nyíl: minta normálisa

Az illesztéshez Gauss függvényt használtunk. A pólusára szerkesztéséhez mintegy 925 mérési pontot használtunk fel. Ebben az esetben nincs szükség defókuszálási korrekció elvégzésére. A mérést a berendezés XTronic - maradó feszültség méréshez készített - szoftverével végeztük el, és az abból kinyert adatokat Microsoft Excel szoftver segítségével értékeltük ki, a pólusábrák megjelenítéséhez Origin szoftvert használtunk.

A két berendezésben eltérő röntgensövet használtunk. A központnélküli diffraktométerek elsősorban maradó feszültség mérésre lettek kifejlesztve, ami azt jelenti, hogy a hátsó szögtartományokat mérik nagy pontossággal különböző ötvözetek esetén. Nem jellemző a Co cső használata. Az azonos vagy összehasonlítható pólusábrák mérése érdekében ezért a központnélküli diffraktométerhez Cu csövet választottunk. Az eltérő sugárzásból adódó különbség az anyagba történő eltérő behatolási mélység, ami azt jelenti, hogy eltérő térfogatból kapjuk az orientációs információt. A Bruker AbsorbDX szoftverének segítségével számításokat végeztünk, hogy ez mekkora eltérést jelent az egyes pólusábrák esetén (a behatolási mélység a Bragg szögtől is függ, ami minden pólusábra esetén eltérő). A számítás eredményét a 2.Táblázat mutatja. Megállapítottuk, hogy a



5.Ábra Sugármenet a konvencionális diffraktométerben; piros nyíl: primer nyaláb, sárga nyíl: szórt nyaláb, kék nyíl: minta normálisa

behatolási mélység között nincs érdemi különbség.

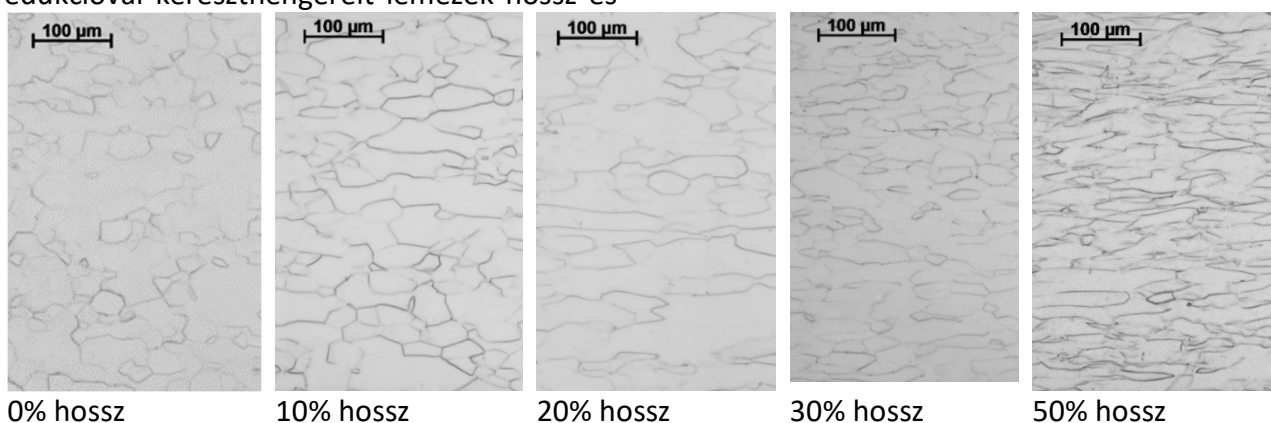
**2.Táblázat Számolt behatolási mélység (p) a nióbbium különböző síksorozatainak {hkl} a mérése során, Co és Cu K $\alpha$  röntgensugárzás alkalmazása esetén (2 $\theta$ )**

{hkl}	CoK $\alpha$		CuK $\alpha$	
	2 $\theta$ [°]	p [ $\mu$ m]	2 $\theta$ [°]	p [ $\mu$ m]
{110}	45	2	38.5	3
{200}	65,5	3	55.6	4
{211}	83	4	69.7	5
{220}	100	5	82.5	6
{310}	118	5	95	7
{400}	-	-	137.8	9

A roncsolásos textúravizsgálatot követően fénymikroszkópos vizsgálatokat is végeztünk a szemcseszerkezet jellemzésére. A lemezekből az utolsó szűrés szerinti hossz-, illetve arra merőleges keresztmetszetből is készítettünk csiszolatot. A minták előkészítése 4 fokozatú mechanikus csiszolással és gyémántpasztával történő polírozással történt. A szemcsehatárok HNO<sub>3</sub>-HCl-HF (3:2:1) oldatban történő maratást követően váltak láthatóvá.

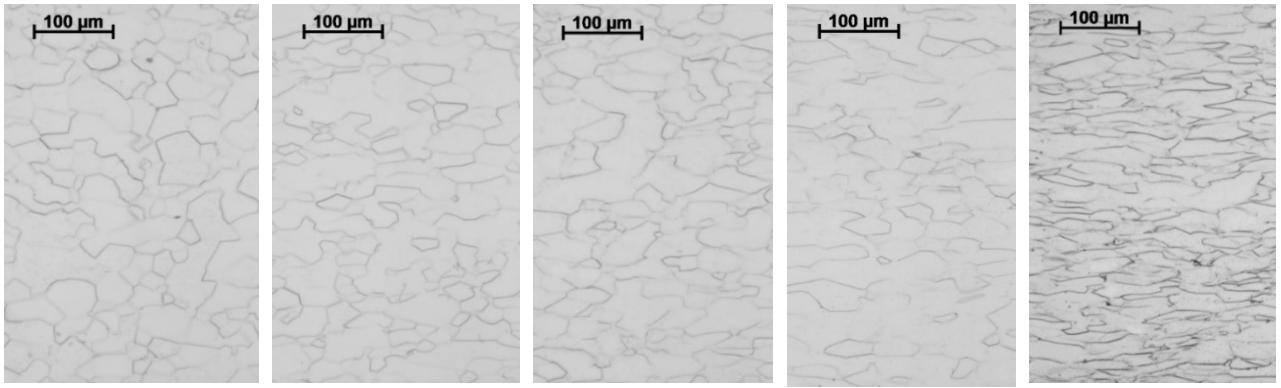
### 3. Eredmények

A kiinduló (0%) valamint a különböző (10%-50%) redukcióval kereszthengereelt lemezek hossz és



keresztmetszetéről készült fénymikroszkópos vizsgálat eredményeit a 6.Ábra mutatja. A kereszthengereelés igazából csak az 50%-os minta esetében okozott erőteljesebb szemcsealak orientációt. Ebben az esetben a hengereelési irányba erősen nyúlt szemcsék dominánsak. Az ettől kisebb mértékű alakítás alig észrevehető változást okoz a szemcsék elhelyezkedésében és alakjában. Ugyanez igaz a keresztirányból kivett minták esetében is.

A röntgendiffrakciós eredményeket a 7-9.Ábrák mutatják. Az eredmények összevetésénél vegyük figyelembe, hogy a konvencionális berendezésben a mérési adatok CHI=75°-ig, az újraszámolt adatok CHI=90°-ig, a központ nélküli berendezésben pedig CHI=60°-ig lettek meghatározva. A pólusábrák érdemi információja minden esetben beleesik a 60°-os tartományba, így központ nélküli berendezéssel meghatározott pólusábrák is kellő információval szolgálnak. Amit szintén figyelembe kell venni az összehasonlítás során, hogy a konvencionális és a központ nélküli berendezéssel meghatározott pólusábrák egymáshoz képest bizonyos FI szöggel el lehetnek fordulva, mivel nincs kötött mintatartó (ez a módszer előnye), így az operátoron múlik, hogy hogyan helyezi el a mintát a robot koordináta rendszeréhez képest.



0% kereszt

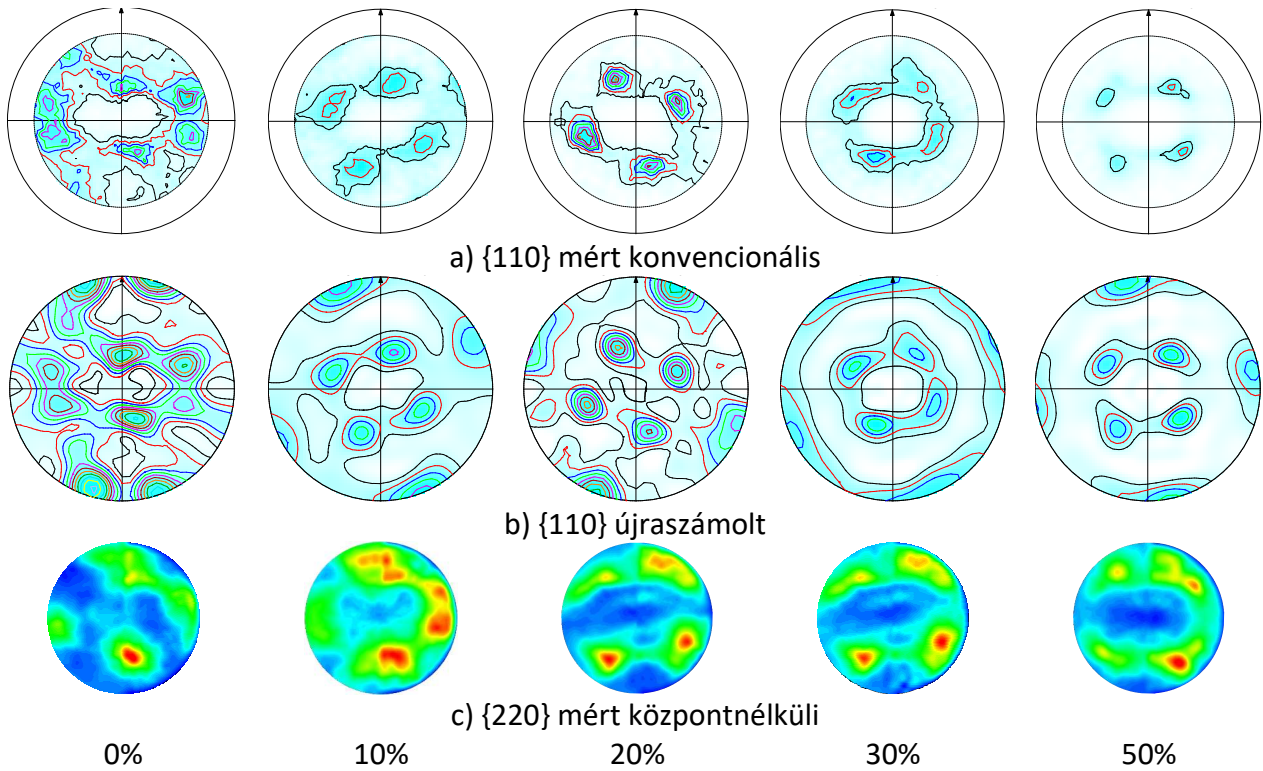
10% kereszt

20% kereszt

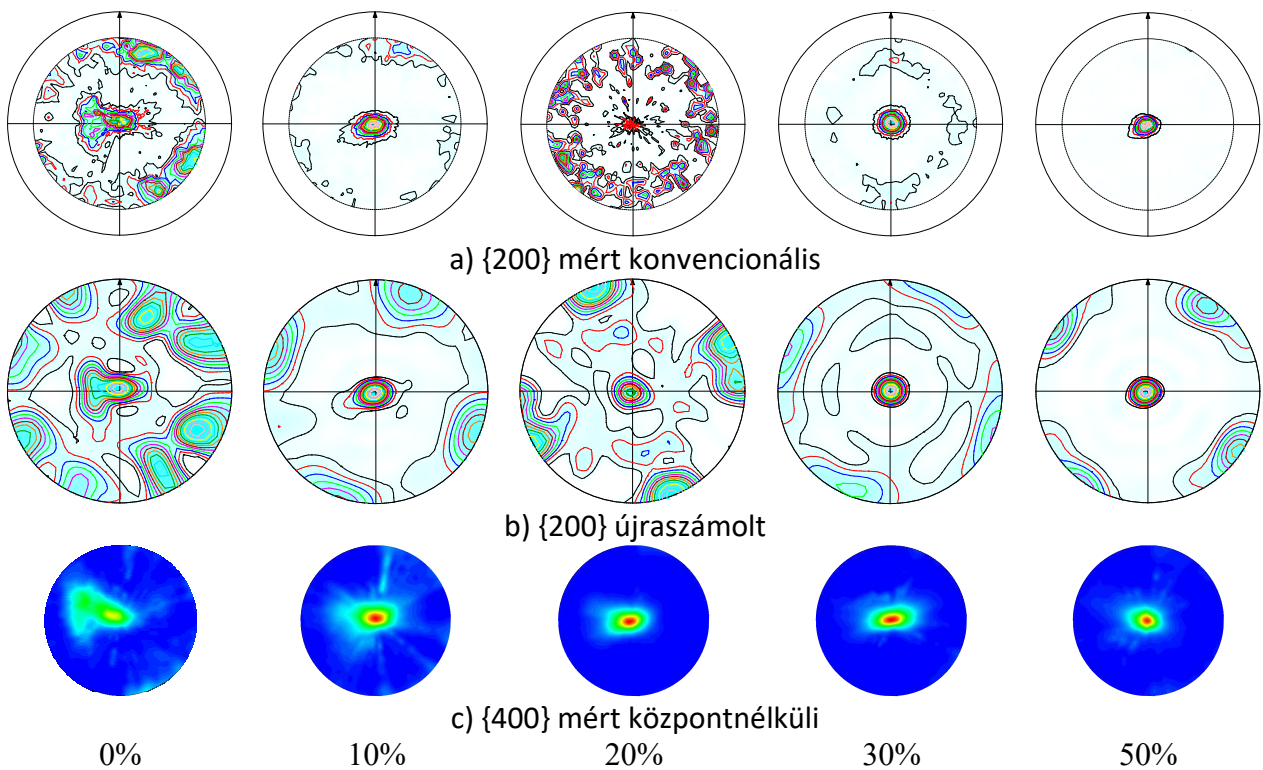
30% kereszt

50% kereszt

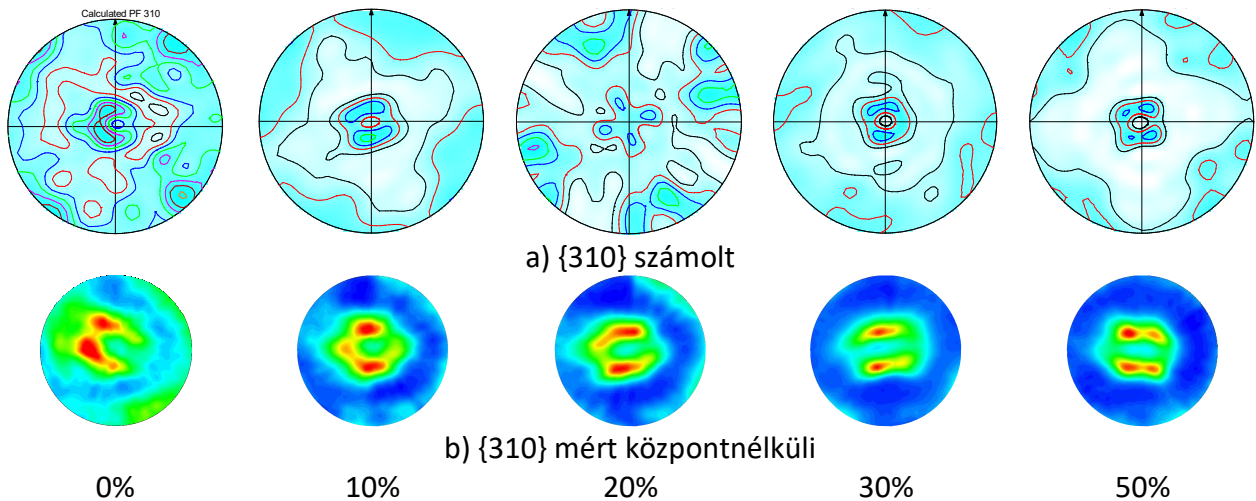
**6.Ábra Fénymikroszkópos képek a kiinduló (0%) és a különböző redukcióval 10%-50% keresztengerelt lemezek hossz- és keresztmetszetéről.**



7. ábra A kiinduló, és a különböző redukcióval (0%-50%) keresztengerelt nióbbium pólusábrák a)  $\{110\}$  konvencionális berendezéssel mérve b) triklin szimmetriát feltételezve újraszámolva és c)  $\{220\}$  központnélküli berendezésben mérve.



8. ábra A kiinduló, és a különböző redukcióval (0%-50%) keresztengerelt nióbbium pólusábrák a)  $\{200\}$  konvencionális berendezéssel mérve b)  $\{200\}$  triklin szimmetriát feltételezve újraszámolva és c)  $\{400\}$  központnélküli berendezésben mérve.



9. ábra A kiinduló, és a különböző redukcióval (0%-50%) kereszthengertelt nióbbium {310} pólusábrák a) konvencionális berendezéssel mért pólusábrák ODF szintéziséből kiszámolva és b) központnélküli berendezésben mérve.

A központ nélküli diffraktométerben ez szintén igaz, csak abban az esetben a mintatartó jobban segít a helyes pozicionálásban, hogy a hengerlési irány a valóban  $FI=0^\circ$ -kal essen egybe. A konvencionális pólusábrák értelmezésénél a szintvonalak sűrűsödése, a nem konvencionális pólusábrák esetében a kékből a vörös színbe hajlás fejezi ki az intenzitások, a textúra mérőszámok növekedését, vagyis a pólusok erősödését. A textúra mérőszámok értékei pólusábránként változnak, mert az intenzitás értékeket sok más egyéb tényező is befolyásolja. Így a vizsgálat ezen szakaszában a pólusábrák mintázatát tudjuk összevetni.

A 7. ábra mutatja az {110} és a {220} pólusábrákat. A kiinduló minta nagyon gyenge aszimmetrikus alakításra utaló textúrát mutat, ami már a 10%-os redukciót követően kezdi felvenni a négyes szimmetriára jellemző értéket. A redukció növelésével ez a négyes szimmetria erősödik. Összehasonlítva a kétféle módszerrel mért értékeket nagyon hasonló eredményt kapunk. A 20%-os redukcióval alakított minta esetében biztosan volt elfordulás a mintapozíciók között. A központnélküli berendezéssel felvett pólusábrák is megfigyelhető a négyes szimmetria már a legkisebb alakítás után. A 8.Ábra mutatja a {200} és a {400} pólusábrákat. Nagyon erős intenzitás maximumot kapunk a pólusábrák közepén mindkét síksorozat esetében. A  $(200)$  sík  $90^\circ$ -ot

illetve  $45^\circ$ -ot zárhat be az  $(110)$  síkkal, ami az újraszámolt pólusábrákban nagyon jól látható. Ebből azt a következtetést tudjuk levonni, hogy a domináns textúra, amikor az elemi cellák lapja párhuzamos a hengerelt felülettel, míg a lapátló a hengerlési iránnyal. A  $(310)$  sík a  $(200)$  síkkal több szöget is bezárhat úgymint  $18^\circ$ ,  $71^\circ$ ,  $90^\circ$ . A 9.Ábrán látható pólusábrákban a  $18^\circ$ -os síkokat látjuk. Elemi geometriából adódik, hogy az  $(110)$  és a  $(310)$  síkok között  $26^\circ$ ,  $47^\circ$ ,  $63^\circ$  és  $71^\circ$  lehet. A kereszthengertelt állapotban az 50%-os fogyást követően a  $47^\circ$ -os síkok lesznek dominánsak, mivel  $FI$  szög szerint nagyon közel esnek az intenzitás maximumok a {310} és a {110} mért pólusábrák között. Megállapíthatjuk, hogy a konvencionális, illetve a központnélküli diffraktométerrel meghatározott pólusábrák jó egyezést mutatnak.

#### 4. Összefoglaló

Különböző (10%, 20%, 30%, 50%) redukciókkal kereszthengertelt nagy tisztaságú nióbbium textúráját vizsgáltuk konvencionális és központnélküli diffraktométerrel. A központnélküli diffraktométer alkalmazása során nincs szükség mintakivágásra és defókuszálási korrekcióra. A pólusábrák felvétele során a maradék ausztenit tartalom vizsgálathoz kifejlesztett detektor tartó ívet és a maradé feszültség mérési szoftvert használtuk. Nióbbium esetében  $Cu\ K\alpha$  sugárzás



alkalmazásával {220}, {400} és a {310} pólusábrák kimérésére volt lehetőség CHI módban, CHI= 0-65° és FI=0-360° tartományban. A mért pólusábrákat összevetettük konvencionális, mintakivágást igénylő módszerrel meghatározott pólusábrákkal. Az összehasonlítás eredményeként megállapítottuk, hogy az általunk először alkalmazott textúra vizsgálati módszer alkalmas pólusábra felvételére. Az így kapott pólusábrák információ tartalma megegyezik a konvencionális módon felvett pólusábrákkal. A keresztthengerlés eredményeként már a 10%-os fogyást követően megjelent a négyes szimmetria, mely egyre erőteljesebbé vált a redukció előrehaladásával.

## 5. Köszönetnyilvánítás

„A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.” A vizsgálati módszer kidolgozását a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal NKFIH K 119566 projektje támogatta. A nióbbium keresztthengerlését Szabó Gábor, Szűcs Máté és Puskás Csaba végezte.

## 6. Irodalmi hivatkozások

[1] Kocks,U.F.; Tomé,C.N.; Weng,H.R. 1998. Texture and anisotropy. UK: Cambridge University Press  
[2] Suwas,S.; Ray,K.R. 2014. Crystallographic Texture of Materials. London: Springer-Verlag  
[3] Engler,O.; Randle,V. 2010. Introduction to texture analysis. CRC Press.  
[4] Davim,J.P. 2015 Modern Manufacturing Engineering, Switzerland: Springer  
[5] Li,X.; Al-Samman,T. *Materials & Design*, 32. **2011**, 4385–4393.  
[6] Tang,W.; Huang,S.; Li,D.; Peng,Y. *Journal of Materials Processing Technology*, 215. **2015** 320-326.

[7] Huh,M.Y.; Cho,S.Y.; Engler,O. *Materials Science and Engineering A*, A315. **2001** 35–46.  
[8] Wronski, S.; Wrobel,M.; Baczmanski, A.; Wierz-Banowski,K *Materials Characterization*, 77. **2013** 116–126.  
[9] Gallifa,T.A at al. 2019 Proc. Of SRF2019. 19th International Conference on RF Superconductivity, Dresden, Germany, 27. Jun. 2019. p 7  
[10] Mertinger,V; Santillana,I.A.; Benke, M; Gallifa,A.T.; Hlavács,A; Janovszky,D; Kárpáti, V; Krállics,Gy; Mikó,T; Palotás,A.B; Sepsi,M; Szabó,G; Szobota,P; Szűcs,M. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 903, 2020 012019  
[11] Pozsgai Imre: Képkalkotás, kémiai analízis és szerkezeti vizsgálat a korszerű pásztázó elektronmikroszkópiában, 2016 Typotex  
[12] Krawitz,A.:Introduction to Diffraction in Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons , 2001  
[13] Benke,M; Mertinger,V; Sepsi,M; Karpáti,V “Measuring Methods for Centerless X-ray Diffractometers to Obtain Pole Figures and their Cuts in  $\Omega$  and Modified  $\Psi$  Modes”, Hungarian patent P1600500  
[14] Fitzpatrick,M.E., Fry,A.T., Holdway,P.; Kandil,F.A.; Shackleton,J.;Suominen, L. **2005**. 09. Determination of residual stresses by X-ray diffraction. GUIDE.  
[15] Sepsi, M.; Mertinger,V.; Benke,M. *Materials Characterization*, 151. **2019** 351–357.  
[16] Sepsi Máté: Teljes pólusábra meghatározására alkalmas mérési módszer kidolgozása és anyagtudományi alkalmazása központnélküli röntgendiffraktométerekre, Szakdolgozat Miskolci Egyetem, 2017  
[17] Sepsi Máté: Archaikus és rekonstrukciós ezüst tárgyak roncsolásmentes anizotrópia vizsgálata röntgendiffrakcióval, Diplomadolgozat, Miskolci Egyetem, 2019  
[18] Sepsi,M.; Mertinger,V; Benke,M. “*IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng* 375 012036, **2018**