

A " Mikroszerkezet karakterizációja röntgen vonalprofil analízis alapján"

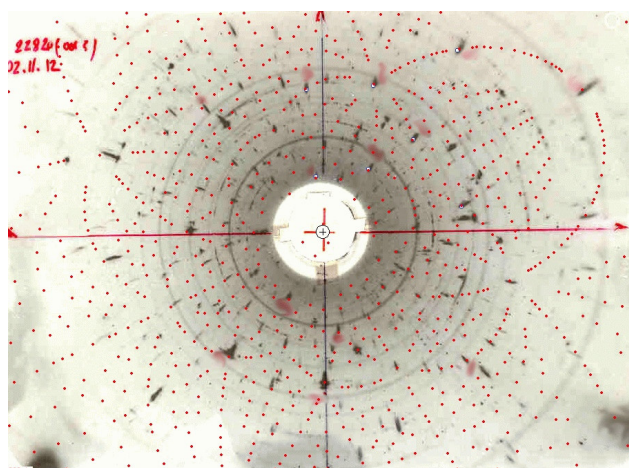
a T-046990, OTKA pályázat szakmai zárójelentése

Ungár Tamás

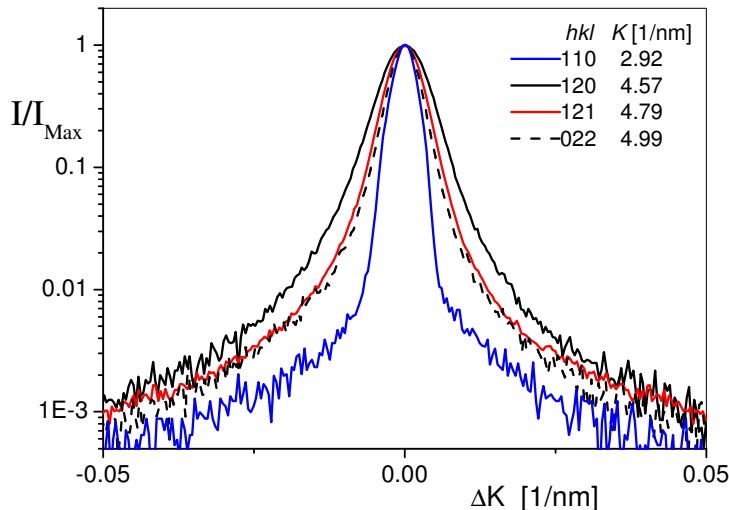
ELTE, TTK, Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

1. Az aktív Burgers vektorok meghatározása a földkéreg mély rétegeiben fekvő perovszkitokban

A földkéregben mintegy 100 km-es mélységben fekvő természetes perovszkitok, amelyek döntő részben MgSiO_3 -ból és különböző fénoxidokból állnak, aktív Burgers vektorainak ismerete fontos feltétel a szimulációs modellek felállításához. A Bayreuth-i Európai Geológiai Kutató Központban 40 GPa nyomáson, 1400 °C hőmérsékleten előállított MgSiO_3 szobahőmérsékleten, atmoszférikus nyomáson olyan metastabil állapotba kerül, amely elektronsugár hatására spontán amorfizálódik, ezért elektronmikroszkópban nem vizsgálható. A mikroszerkezet, pontosabban a diszlokációs szerkezet vizsgálatára ezért a röntgen vonalprofil analízis (RVPA) módszerét alkalmaztuk. Sikerült a vizsgálandó mintán egyetlen, viszonylag nagy kristallit orientációját Laue felvételek segítségével meghatározni. Az 1. ábrán a mért (sötét szürkében megjelenő) és a számolt (vörössel jelölt) diffrakciós foltokat láthatjuk. Ezen az orientált szemcsén mintegy 11 különböző indexű reflexió vonalprofilját sikerült megmérni. Az egyes profilokhoz meghatároztuk a diszlokációs kontraszt faktorokat. A mért kontraszt faktorokat összevetettük a kristályszerkezettel kompatibilis lehetséges diszlokációk kontraszt faktoraival. Ezzel a módszerrel meghatározzuk az aktív Burgers vektorokat és csúszási rendszereket. Megállapítottuk, hogy magashőmérsékleten nagy nyomáson ugyanazok a Burgers vektorok és csúszási rendszerek működnek, mint szobahőmérsékleti, egyensúlyi körülmények között.



1. ábra Egyetlen, viszonylag nagy kristallit orientációjának Laue felvétele, ezek a sötétszürke diffrakciós foltok közül a legerősebbek. A vörössel jelölt kis foltok a számolt diffrakciós képet mutatják. Jól látható az erős mért foltok és a számolt foltok jó egyezése.



2. ábra. Néhány tipikus diffrakciós intenzitáseloszlás logaritmusos intenzitás skálán. A szélesedés nem monoton növekedése jól megfigyelhető az indexek mellett feltüntetett $K=2\sin\theta/\lambda$ értékek alapján. Ez a viselkedés az u.n. deformációs anizotrópia, ami a Burgers vektorok meghatározását teszi lehetővé.

[1] P. Cordier, T. Ungár, L. Zsoldos, G. Tichy: Dislocations creep in MgSiO₃ perovskite at conditions of the Earth's uppermost lower mantle, *Nature*, 428. 837-840 (2004)

[2] Krisztián Nyilas, Hélène Couvy, Patrick Cordier and Tamás Ungár, The Dislocation-Structure and Crystallite-Size in Forsterite (Olivine) Deformed at 1400 °C by 11 GPa, *Z. Kristallogr. Suppl.* 23 (2006) 135-140.

2. Térben heterogén diszlokációs szerkezet fluktuációinak és korrelációinak meghatározása germániumban

<123> tengely orientációjú Ge egykristályokat deformáltunk összenyomással 700 és 1000 K közötti hőmérsékleteken. Az így deformált mintákban megmértük a diszlokációs sűrűség térbeli fluktuációját a pásztázó mikrodiffrakció módszerével, mintegy 0,1 mm helyfelbontással. A kapott eredmények igen jó korrelációt mutatnak a TEM vizsgálatokkal.

[3] K. Nyilas, C. Dupas, T. Kruml, L. Zsoldos, T. Ungár, J.L. Martin: Dislocation structures and mechanical behaviour of Ge single crystals deformed by compression, *Mat. Sci. Eng.* A387–389. 25–28 (2004)

[4] T. Kruml, C. Dupas, K. Nyilas, L. Zsoldos, T. Ungár, J.L. Martin, *Proc. 25th Riso, Int. Symp. on Materials Science*, Edit. C. Gundlach et al., Riso National Lab. Roskilde, Denmark, (2004) p.465.

3. NiAl emlékező ötvözet diszlokációs szerkezetének meghatározása az egyes textúra komponensekben

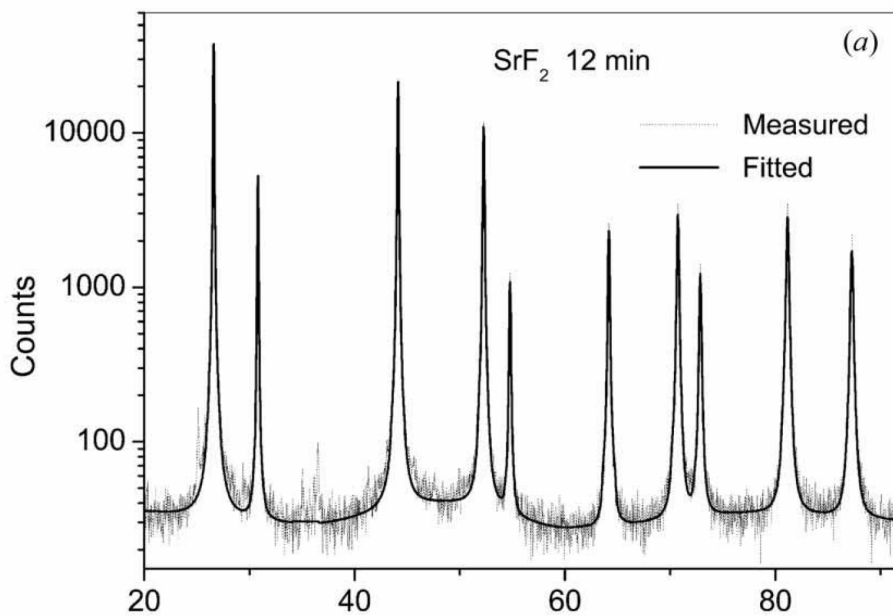
A deformációs anizotrópia sikeresen használható a diszlokációk csavar illetve él jellegének meghatározására, amennyiben a vizsgált mintában a Burgers vektor populáció egyenletes eloszlású vagy, ha a minta nem texturált. Ilyen esetekben a különböző indexekhez tartozó diszlokációs kontraszt faktorok között a *hkl* indexek negyedrendű invariánsai viszonylag egyszerű korrelációt teremtenek. Ez azt jelenti, hogy a teljes diffrakciós spektrum rácsstorzulásnak megfelelő része egyetlen u.n. deformációs vonalprofillal adható meg és deformációs anizotropia miatti változó vonalszélesedés a *hkl* indexekkel korrelált diszlokációs kontraszt faktorokkal skálázható. Sokkal bonyolultabbá válik a helyzet, ha egyik feltétel sem teljesül, vagyis, amikor a különböző kristallitokban különböző a Burgers vektorok populációja és a minta jelentős mértékben texturált. Ilyenkor ugyanis nem korreláltak a diszlokációs kontraszt faktorok, a deformációs anizotropia nem skálázható a *hkl* indexek negyedrendű invariánsaival, sőt az egyes reflexiók különböző kristallit populációktól származnak. Ugyanakkor, felismerve ezeket a körülményeket, mindezt ki is használhatjuk abból a célból, hogy az egyes textúra komponensekben külön-külön meghatározzuk az aktív Burgers vektorokat és a lokális diszlokációsűrűséget. Összenomással deformált, erőteljesen texturált, kétalkotós NiAl ötvözet mintákat vizsgáltunk a röntgen vonalprofil analízis módszerével. Az összenomás irányában [001], [011] és [111] textúrájú mintákban megmértük az összes elérhető vonalprofilt. Az egyes vonalprofilokat az u.n. egyedi kontraszt faktorok módszerével értékeltük ki. Az egyedi kontraszt faktorokat felhasználtuk a Burgers vektor típusok valamint a lokális diszlokációsűrűségek kísérletes meghatározásához. Megvizsgáltuk és diszkutáltuk az u.n. kemény illetve puha orientációjú kristallit populációk mechanikai tulajdonságai és a lokális diszlokációszerkezet közötti kapcsolatokat. Megállapítottuk, hogy a különböző kristallit populációk deformáció által létrehozott saját energiái között lényegesen kisebb különbségek vannak, mint azt a korábbi fél-elméleti megfontolások alapján elvárnánk.

[5] K. Nyilas, T. Ungár, W. Skrotzki, Dislocation densities in soft and hard oriented grains of compressed NiAl polycrystals, Int. J. Mater. Sci., (2008) nyomdában.

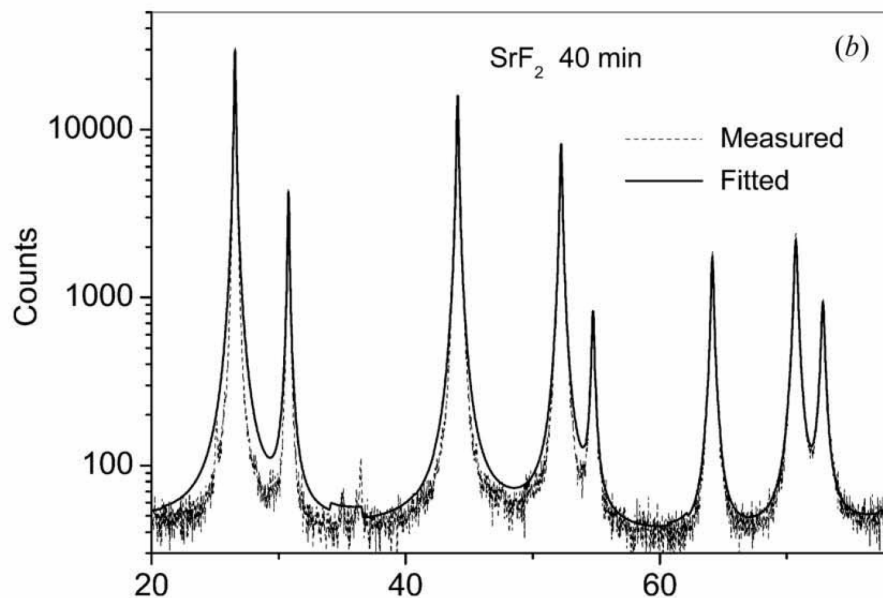
4. A reciprok térben átlapoló diffrakciós maximumok interferenciájának hatása a vonalszélesedésre

Alkáli földfémek fluoridjaiból különböző szemcsméretű sorozatokat állítottunk elő golyósmalomban történő őrléssel [6]. A kristallitméretet valamint a deformáció során keletkező diszlokációűrűséget a teljes diffrakciós spektrumok kiértékelésére kifejlesztett Convolutional Multiple Whole Profile (CMWP) módszerrel [7] illetve numerikus eljárással határoztuk meg. A diffrakciós spektrumok kiértékelése során feltűnt, hogy a rövid illetve hosszú ideig őrlött minták esetében a CMWP módszer tökéletesen illeszkedő intenzitás profilokat szolgáltatott. Ennek egy tipikus példáját mutatja a 3. ábra. Ugyanakkor a közepesen hosszú ideig őrlött minták esetében, az amúgy 12 vagy 15 Bragg reflexióból álló spektrumoknak az első néhány, 2 vagy 4, reflexiója szisztematikusan keskenyebb, mint az illesztett, vagyis számolt intenzitás profilok. Ennek egy tipikus példáját mutatja a 4. ábra. Mintegy másfél éven át értetlenül álltunk a jelenség előtt, ami egyébként az ezzel kapcsolatos munkánkat is teljes mértékben megrekesztette. Egy 2004-es konferencián hallottuk Rafaja előadását, amiben szerző arról számolt be, hogy epitaxiálisan növesztett polikristályos

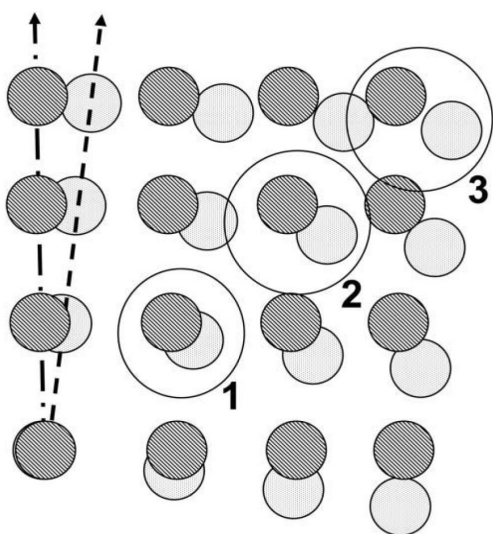
vékonyrétegben, amikor a szomszédos kristallitok orientációs különbségei kicsinyek, néhány fokosak vagy ennél kisebbek és a kristallitok 4-5 nm -nél nem nagyobbak, az első néhány Bragg reflexió kiszélesedése akár egy nagyságrenddel is kisebb lehet, mint az a 4-5 nm-es kristallitméretnek megfelelő. A magyarázat (utólag) igen egyszerű: a szomszédos, kis orientáció különbségű kristallitok reciprokrácsai csak kismértékben vannak egymáshoz képest elfordulva, amint ez az 5. ábrán látható. A kicsiny kristallitméret miatt a diffrakciós maximumok erőteljesen kiszélesednek és az első néhány maximum átfed, amint ez az 5. ábrán ugyancsak jól látható. Az átfedő maximumok jelentős mértékben megnövelik a szórás koherenciáját, ami a megfelelő Bragg reflexiók keskenyedéséhez vezet. Amint az átfedés a magasabb indexű reflexiók esetében már nem jön létre, úgy ez az effektus megszűnik. Az alkáli földfémek fluoridok esetében, az ionos kristályok kitüntetett orientációval tapadnak egymáshoz, ezzel egy lokális textúra alakul ki az amúgy por alakú mintában. Ez teszi lehetővé a Rafaja által észlelt effektus létrejöttét ezekben a mintákban. A hosszabb ideig őrölt mintákban pedig létrejön egy olyan, egyébként jól ismert hatás, ami szerint a hosszú őrölés hatására koaleszcencia révén ismét megnő a kristallit méret.



3. ábra. 12 perces, rövid ideig őrölt SrF₂ mért és illesztett diffrakciós spektrumai.



4. ábra 40 perces, közepesen hosszú ideig őrölt SrF₂ mért és illesztett diffrakciós spektrumai. Az ábrán a spektrumoknak csak az első részét tüntettük fel, azért, hogy a mért és illesztett spektrumok közötti különbség jobban látható legyen.



5. ábra Két szomszédos kicsiny kristallit reciprok rácsának sematikus ábrája. A két kristallit között 1-2 fokos kis orientáció különbséget feltételezünk. Az 1-el illetve 2-vel jelölt diffrakciós foltok átlapolnak, viszont a 3-al jelöltek már nem.

[6] Ribárik, G., Audebrand, N., Palancher, H., Ungár, T., Louër, D., Dislocations and crystallite size distributions in ball-milled nanocrystalline fluorides MF₂ (M = Ca, Sr, Ba, Cd) determined by X-ray diffraction-line-profile analysis, *J. Appl. Cryst.*, (2005) 38, 912-926.

[7] G. Ribárik, J. Gubicza, T. Ungár: Correlation between strength and microstructure of ball-milled Al-Mg alloys determined by X-ray diffraction, *Mat. Sci. Eng. A387-389*. 343-347 (2004)

5. Az aktív Burgers-vektor populációk dinamikájának meghatározása RVPA mérés alapján erőteljesen deformált Ti-ban

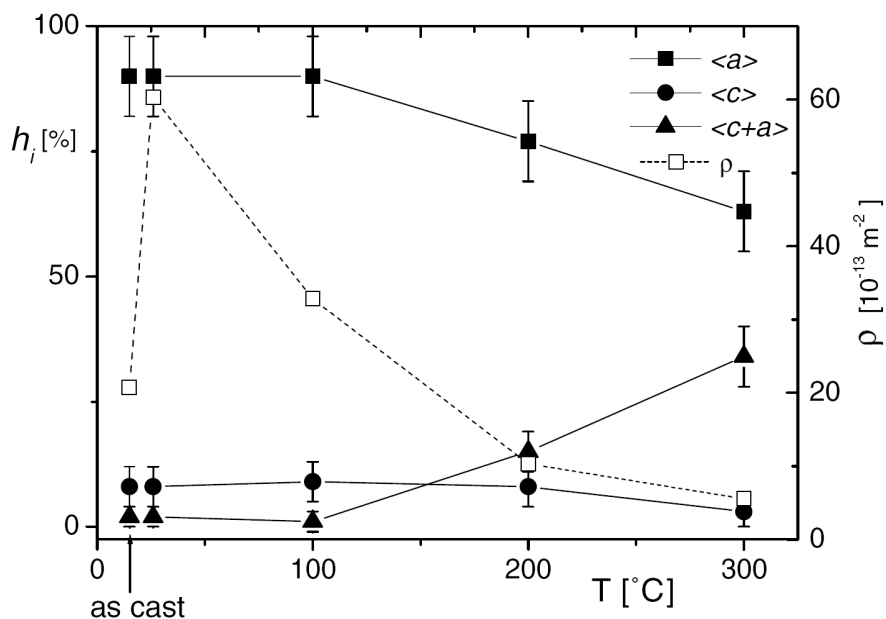
Az u.n. könyöksajtolás (equal channel angular pressing, ECAP) módszerével erőteljesen deformált Ti mintákban meghatároztuk a diszlokációsűrűséget, valamint az aktív csúszási rendszereket [8,9]. Megállapítottuk, hogy (i) a nagymértékű deformációt követően döntően $\langle a \rangle$ és $\langle c+a \rangle$ típusú diszlokációk vannak jelen az anyagban és a $\langle c \rangle$ típusú diszlokációk hányada elhanyagolhatóan kicsiny, (ii) a diszlokáció sűrűség eléri a 10^{16} m^{-2} extrém nagy értékeket és (iii) a kristallit méret lecsökken 40-50 nm értékekig.

[8] I.C. Dragomir, D.S. Li, G.A. Castello-Branco, H. Garmestani, R.L. Snyder, G. Ribarik, T. Ungár, Evolution of dislocation density and character in hot rolled titanium determined by X-ray diffraction, *Materials Characterization* 55 (2005) 66-74.

[9] E. Schafner, K. Nyilas, S. Bernstorff, L. Zeipper, M. Zehetbauer, T. Ungár, Microstructure of post deformed ECAP-Ti investigated by Multiple X-Ray Line Profile Analysis, *Z. Kristallogr. Suppl.* 23 (2006) 129-134.

6. Az aktív Burgers-vektor populációk meghatározása Mg-ban

Módszert dolgoztunk ki az aktív Burgers vektor populációk meghatározására Mg-ban. Különböző hőmérsékleteken nyújtással deformált Mg -ban megállapítottuk, hogy mintegy $100 \text{ }^\circ\text{C}$ deformációs hőmérsékletig döntően $\langle a \rangle$ típusú diszlokációk vannak jelen. Magasabb hőmérsékleteken jelentősen megnő a $\langle c+a \rangle$ típusú diszlokációk jelenléte, amint ez a 6. ábrán jól látható.

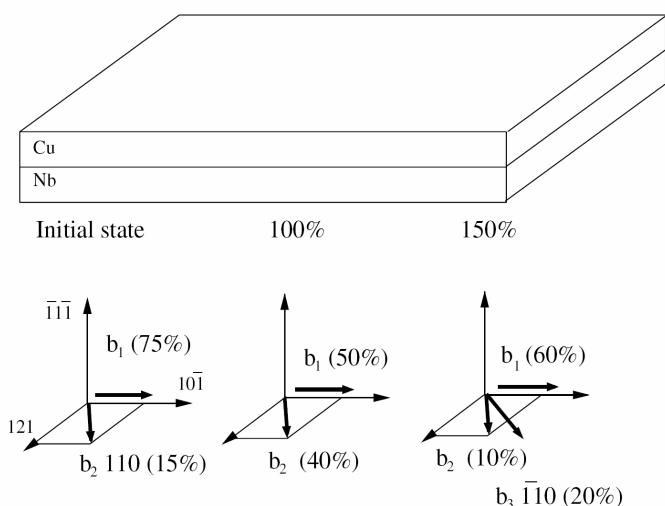


6. ábra Az aktív Burgers vektor típusok a deformációs hőmérséklet függvényében nyújtással deformált Mg-ban.

[10] K. Máthis, K. Nyilas, A. Axt, I.D. Cernatescu, T. Ungár, P. Lukáč: The evolution of non-basal dislocations as a function of deformation temperature in pure magnesium determined by X-ray diffraction, *Acta Mater.* 52. 2889-2894 (2004)

7. Határrétegek mikroszerkezete nanokristályos multirétegekben

Egymásban semmilyen hőmérsékleten nem oldódó, magnetron porlasztással előállított, nanokristályos Cu–Nb multirétegben megállapítottuk, hogy a Kurdjumov-Sachs szabályoknak megfelelően epitaxiálisan illeszkedő Cu és Nb határrétegekben a Burgers vektorok párhuzamosak a határréteg síkjával és a diszlokációsűrűség eléri az elméleti határértékeket [11]. A 7. ábra sematikusan mutatja a multiréteg egy elemét és a Cu rétegben a Burgers vektorokat a kiindulási valamint 100 % és 150 % hengerlés után.



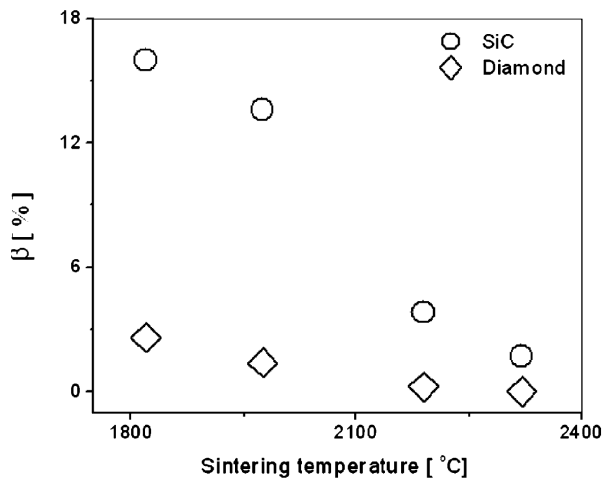
7. ábra A Cu-Nb multiréteg egy elemének sematikus rajza, továbbá a Cu rétegben a Burgers vektorok a kiindulási valamint 100 % és 150 % hengerlést követően.

[11] K. Nyilas, A. Misra, T. Ungár: Micro-strains in cold rolled Cu–Nb nanolayered composites determined by X-ray line profile analysis, *Acta Mater.* *Acta Materialia* 54 (2006) 751–755

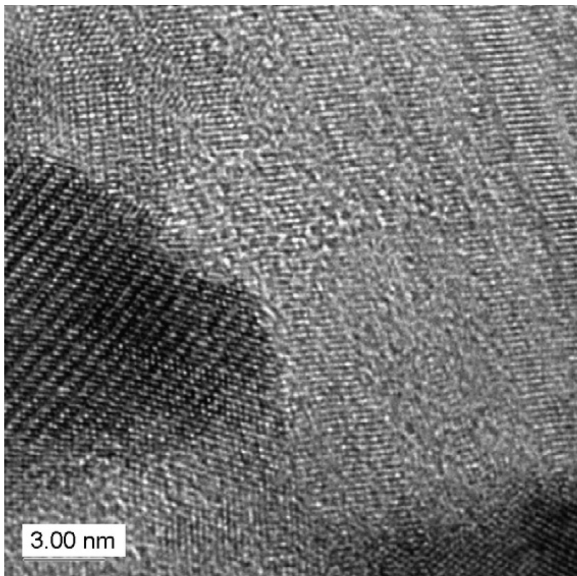
8. Gyémánt és SiC nanokompozitok mikroszerkezete

Kemény anyagok egyik perspektívikus változata a gyémánt és SiC nanoporokból szinterelt nanokompozit. Ezzel a célkitűzéssel megvizsgáltuk az ilyen nanoporok szinterelésével előállított anyagok mikroszerkezetét és a mikroszerkezeteket összevetettük a mechanikai tulajdonságokkal. A mikroszerkezet vizsgálata közben tovább fejlesztettük a rétegződési hibák vonalprofilokra gyakorolt hatásának elméletét is és megvizsgáltuk az ikerhatárok gyakoriságát a gyémánt és SiC nanokompozitokban [12-17]. Megállapítottuk többek között, hogy a SiC kristallitokban általában lényegesen nagyobb a ikerhatár sűrűség, mint a gyémánt

krisztallitokban. Ezt mutatják a 8. és 9. ábrák, ahol β a RVPA által mért ikerhatár sűrűség illetve gyakoriság (8. ábra) és a 9. ábrán látható TEM kép, amelyen a sötétebb illetve világosabb területek rendre a SiC illetve gyémánt kristallitokhoz tartoznak.



8. ábra A RVPA módszerével meghatározott ikerhatár sűrűség illetve gyakoriság, β , a szinterelés hőmérsékletének függvényében



9. ábra Ikerhatárok a SiC (sötétebb terület) illetve gyémánt (világosabb terület) kristallitokban.

[12] C. Pantea, J. Gubicza, T. Ungár, G.A. Voronin, N.H. Nam, T.W. Zerda: High pressure effect on dislocation density in nano-size diamond crystals, *Diamond and Related Materials*, 13. 1753-1756 (2004)

[13] G.A. Voronin, T.W. Zerda, J. Gubicza, T. Ungár, S. N. Dub: Properties of nanostructured diamond – silicon carbide composites sintered by high-pressure infiltration technique, *J. Mater. Res.* 19. 2703-2707 (2004)

[14] B. Palosz, E. Grzanka, C. Pantea, T. W. Zerda, J. Gubicza, T. Ungar: Microstructure of nanocrystalline diamond powders studied by powder diffractometry, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 064316.

[15] J. Gubicza, T. Ungár, Y. Wang, G. Voronin, C. Pantea, T. W. Zerda: Microstructure of diamond-SiC nanocomposites determined by X-ray line profile analysis, *Diam. Relat. Mater.*, 15 (2006) 1452 – 1456.

[16] J. Gubicza, S. Nauyoks, L. Balogh, J. Labar, T. W. Zerda, T. Ungár, Influence of sintering temperature and pressure on crystallite size and lattice defect structure in nanocrystalline SiC, *J. Mater. Res.* 22 (2007) 1314-1321.

[17] L. Balogh, S. Nauyoks, T. W. Zerda, C. Pantea, S. Stelmakh, B. Palosz, T. Ungár, Structure of diamond-silicon carbide nanocomposites as a function of sintering temperature at 8 GPa, *Mater. Sci. Eng. A*, (2008) in the press.

9. Vakanciakoncentráció meghatározása erősen alakított fémekben

A diffrakciós spektrumokban a Bragg reflexiók alatt megjelenő szórt intenzitás vizsgálatából meghatároztuk az alakítás során a diszlokációk dinamikus annihilációja során keletkező vakanciák illetve vakancia klaszterek sűrűségét. Megállapítottuk, hogy erőteljes alakítás során ez a vakancia koncentráció elérheti a olvadáspont közeléhez tartozó egyensúlyi vakancia koncentrációt [18].

[18] T. Ungár, E. Schafler, P. Hanák, S. Bernstorff, M. Zehetbauer, Vacancy production during plastic deformation in copper determined by in-situ X-ray diffraction, *Mater. Sci. Eng. A*, 462 (2007) 398–401.

10. A koherenciaméret fizikai jelentésének elméleti vizsgálata

A röntgen vonalprofil analízis által nyújtott egyik paraméter az u.n. koherensen szóró domének átmérője, amit gyakran krisztallit méretnek is nevezünk. Ez a méret sok esetben egybevág, de sok esetben eltér az elektronmikroszkópban megfigyelhető megfelelő méreteként. Elméleti vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a röntgen diffrakció koherenciája nem csak akkor szűnik meg, ha a szomszédos tartományok között orientáció különbség van, hanem akkor is, ha ezeket a tartományokat olyan dipól jellegű diszlokáció fal választja el egymástól, amely nem okoz orientáció különbséget. Megállapítottuk, hogy ilyen esetekben a diszlokáció fal által elválasztott tartományokban a kristálysíkok egymáshoz képest eltolódnak. Ez az eltolódás egy fázistolást eredményez a szórt hullámok között, ami ugyanakkor random eloszlású az egész besugárzott térfogatban. Végeredményben a szórás csak a diszlokáció falakkal elválasztott tartományokon belül marad koherens. A diszlokáció falakkal elválasztott tartományok, illetve a kicsiny orientáció különbséggel illeszkedő tartományok az u.n. szubszemcsék. Ezzel megmutattuk, hogy a röntgenes domén átmérő a metallográfiai szubszemcse átmérőnek felel meg. Ezt az eredményt a kísérletek is igen jól alátámasztják [19-21].

[19] T. Ungár: Microstructure Parameters from X-ray Diffraction Peak Broadening, *Scripta Mater.* 51. 777–781 (2004)

[20] T. Ungár, Subgrain Size-Distributions, Dislocation Structures, Stacking- and Twin Faults and Vacancy Concentrations in SPD Materials Determined by X-ray Line Profile Analysis, Mater. Sci. Forum, 503-504 (2005) 133-140.

[21] T. Ungár, G. Tichy, J. Gubicza and R. J. Hellmig, Correlation between subgrains and coherently-scattering-domains, J. Powder Diffraction, 20 (2005) 366-375.

11. A rétegződési hibák vonalprofilokra gyakorolt hatásának elméleti vizsgálata

A diszlokációk mellett gyakran előfordulnak rétegződési hibák illetve ikerhatárok. Elméleti eredményekre alapozott numerikus eljárásokkal szisztematikusan megvizsgáltuk a rétegződési hibák illetve ikerhatárok hatását a röntgen diffraktogramokra fcc szerkezetű anyagokban. A kapott eredmények alapján kiegészítettük az eddigi numerikus módszereinket a rétegződési hibák és a diszlokáció szerkezet egyidejű vizsgálata céljából. Megmutattuk, hogy nanokristályos illetve szubmikrom szemcseméretű Cu anyagokban az ikerképződés akkor válik a deformációs mechanizmus szempontjából jelentőssé, ha a krisztallitméret, illetve a szubszemcse méret kisebb, mintegy 40-50 nm [22-24].

Az fcc szerkezetű anyagokon elért eredmények alapján megvizsgáltuk a rétegződési hibák illetve ikerhatárok hatását hexagonális szerkezetű hcp anyagok röntgen diffraktogramjaira [25]. Ezek a kutatásaink jelenleg még kezdeti stádiumban vannak, jelenleg is dolgozunk mind az elméleti mind a kísérleti jellegű kérdések megoldásán.

[22] L. Balogh, G. Ribárik and T. Ungár, Stacking Faults and Twin Boundaries in fcc Crystals Determined by X-ray Diffraction Profile Analysis, J. Appl. Phys. 100, 023512 (2006)

[23] T. Ungár, L. Balogh, Y. T. Zhu, Z. Horita, C. Xu and T. G. Langdon, Using X-ray microdiffraction to determine grain sizes at selected positions in disks processed by high-pressure torsion, Mat. Sci. Eng. A, 444 (2006) 153-156.

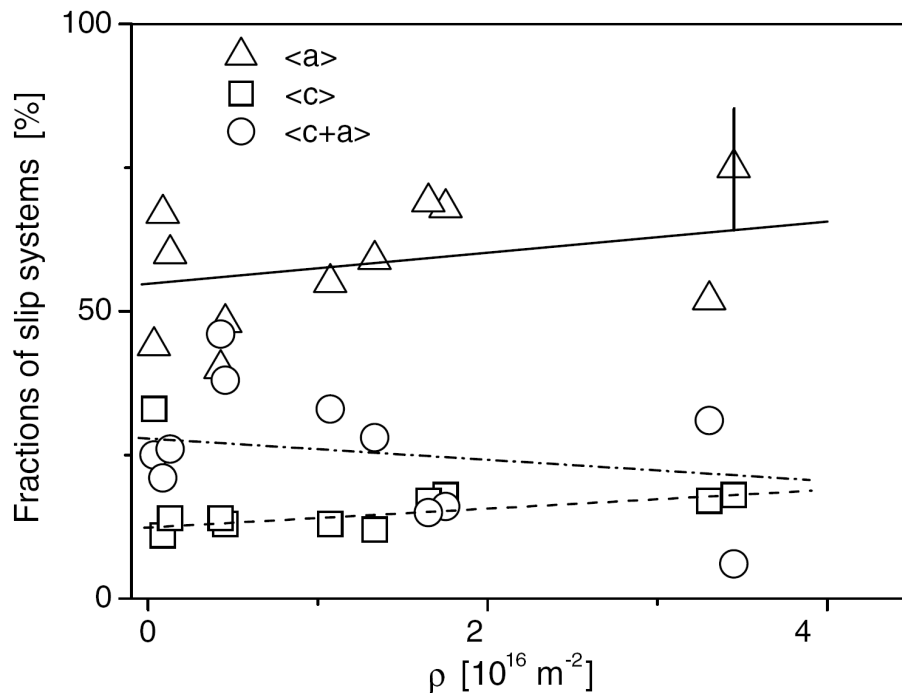
[24] Levente Balogh, T. Ungár, Yonghao Zhao, Y.T. Zhu, Zenji Horita, Cheng Xu, Terence G. Langdon, Influence of stacking-fault energy on microstructural characteristics of ultrafine-grain copper and copper-zinc alloys, Acta Materialia 56 (2008) 809–820

[25] T. Ungár, M. G. Glavicic, L. Balogh, K. Nyilas, A. A. Salem, G. Ribárik, S. L. Semiatin, The Use of X-Ray Diffraction to Determine Slip and Twinning Activity in Commercial-Purity (CP) Titanium, Mater. Sci. Eng. A, (2008) in the press.

12. Egykristály diffrakció polikristályban

A Grenoble-i ESRF szinkrotron mellett mintegy 20 μm nyalábkeresztmetszet felhasználásával a pásztázó mikrodiffrakció módszerével meghatároztuk az aktív Burges vektor típusokat valamint a diszlokációsűrűséget hengerléssel előállított polikristályos Zr egyes krisztallitjaiban. 11 különálló krisztallitban meghatároztuk az aktív Burges vektor típusokat és a diszlokációsűrűséget, amit a 10 ábra mutat. Elsősorban a kísérlet rendkívül bonyolult és nehézkes, ezért az első kísérletet nem követte több próbálkozás. Mindazonáltal a hcp

szerkezetű kristályok mikroszerkezetének valamelyest is informatív meghatározásához szükség van az egykristály típusú diffrakcióra. Az itt elvégzett és [25]-ben leírt kísérletek és hozzájuk kapcsolódó elmélet igen tanulságos a téma szempontjából. A továbbiakban azonban egy gyökeresen más elveken nyugvó kísérleti módszert és eljárást kívánunk kidolgozni és alkalmazni *hcp* szerkezetű anyagok mikroszerkezetének vizsgálatára. Ez viszont már túlmutat a jelen OTKA projekt keretein.



10. ábra Az aktív Burges vektor típusok a diszlokációsűrűség függvényében feltüntetve. Minden egyes adat-hármas (nyitott háromszög-négyzet-kör) egy-egy önálló kristallithoz tartozik.

[26] T. Ungár, O. Castelnau, G. Ribárik, M. Drakopoulos, J.L. Béchade, T. Chauveau, A. Snigirev, I. Snigireva, C. Schroer and B. Bacroix, Grain to grain slip activity in plastically deformed Zr determined by X-ray microdiffraction line profile analysis, *Acta Materialia*, 55 (2007) 1117–1127.

13. A hőmérsékleti anomália és a diszlokációszerkezet kapcsolatának meghatározása képlékenyen alakított Ni_3Al egykristályokban

Összenyomással deformált, Ni_3Al fémközi vegyület egykristályokat vizsgáltunk a röntgen vonalprofil analízis módszerével. A mérések jelenleg még folyamatban vannak. Az eredmények publikálása a közeljövőben várható.