

FÉMLELETEK RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLATAINAK SPECIÁLIS LEHETŐSÉGEI

SPECIAL X-RAY DIFFRACTION METHODS FOR METALLIC ARTIFACTS

MERTINGER VALÉRIA¹, BENKE MÁRTON²

¹Miskolci Egyetem, Fémteni, képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Argum, H3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA-ME Anyagtudományi Kutatócsoport, Argum H3515 Miskolc-Egyetemváros

E-mail: femvali@uni-miskolc.hu, fembenke@uni-miskolc.hu

Abstract

From the beginning of Neolithic many technologies have been applied since metallic objects were produced by humans. All of the applied technologies modify the properties of the crystal structure and microstructure of raw material. The change in the crystal structure is in a strong relation with the applied technology. The selected, most technology sensitive structure properties are residual stress and texture. Using our practical experience of decades in modern age metal technologies, a non-destructive X-ray diffraction method was developed for the examinations of archeological objects. In the present manuscript, the production conditions of several silver objects produced by partially known manufacturing techniques are deduced based on the results of residual stress and texture (crystallographic orientation) examinations and thereby the developed examination method is validated. The results of objects produced by casting or forging, or casting and forging are clearly distinguishable. These methods are improved for the investigation of Seuso artifact in framework of collaboration with Institute for Geological and Geochemical Research, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Hungarian Academy of Sciences.

Kivonat

Az újkőkortól kezdődően mióta az ember fém tárgyakat állít elő, számos technológiát alkalmaz. Az alkalmazott technológiák mindegyike megváltoztatja a fém alapanyag rácsszerkezeti, szövetszerkezeti, mikroszerkezeti jellemzőit. A szerkezetben bekövetkező változás és az alkalmazott technológia szoros korrelációs kapcsolatban áll egymással. Az általunk választott, a technológiára leginkább érzékeny anyagszerkezeti jellemző a maradó feszültség és kristálytani textúra (orientáció). Az újkori fémtechnológia gyakorlatban szerzett több évtizedes tapasztalatainkat felhasználva dolgoztunk ki egy roncsolásmentes röntgendiffrakciós vizsgálati módszert régészeti tárgyak vizsgálatára. Jelen munkánkban különböző, részben ismert módon előállított ezüstdíszek maradó feszültség és textúra vizsgálatának eredményei alapján az előállítás körülményeit határozzuk meg, a kidolgozott vizsgálati módszerünket validáljuk. Az eredmények alapján jól elkülöníthető az öntött és az alakított tárgy, vagy az öntött majd alakított technológiai folyamat eredménye. A vizsgálatok célja a módszer kidolgozása, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézetével történő együttműködés keretén belül történő Seuso leletek vizsgálatának előkészítése.

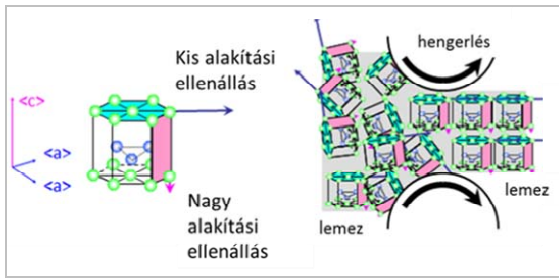
KEYWORDS: RESIDUAL STRESS, TEXTURE, X-RAY DIFFRACTION, METALFORMING

KULCSSZAVAK: MARADÓ FESZÜLTSÉG, TEXTÚRA, RÖNTGENDIFFRAKCIÓ, FÉMMEGMUNKÁLÁS

Bevezetés

A fémek alakadásának első lépése öntéssel vagy képlékeny alakítással történik. Az öntés során a hőelvonás iránya és csíráképződési feltételek szabják meg, hogy a szilárd fázis szemcséi hogyan alakulnak ki (Kurz & Fischer 1986). Nagyon gyakori, különösen az archaikus technológiáknál, ahol az olvadákezelés még nem volt elterjedve, hogy döntően a hőelvonás iránya szabja meg a szilárd fázis növekedését, ezért öntés során egy kristálytanilag erősen anizotróp szerkezet jön létre. Az ilyen anizotrópiát öntési textúrának hívjuk. A képlékeny alakváltozás a fémek döntő többségében

diszlokációs csúszással megy végbe. A diszlokációs csúszás kitüntetett rácssíkokon, kitüntetett irányokban zajlik (Brooks 1982, Chan 1983, Verhoeven 1975, Leslie 1982). Amikor egy fém külső erőhatással alakváltozásra kényszerítünk, akkor az egyes kristallitok igyekeznek befordulni a számukra kedvező alakváltozási pozícióba. Amennyiben az alakítás közben vagy után nincs meg az elegendő hajtóerő a rácspan létrejött hibák kigyógyítására (az újrakristályosodás nem tud végbemenni) akkor ez a pozíció, irányított, polikristályos anizotróp elrendeződés hosszú távon megmarad (**1. ábra**). Ez az alakítási textúra (Engler & Randle 2010).



1. ábra: Alakítási textúra kialakulásának elvi ábrája hexagonális fém hengerlésekor (forrás: <http://phys.org/news/2013-03-room-temperature-formability-damping-magnesium-alloy.html>)

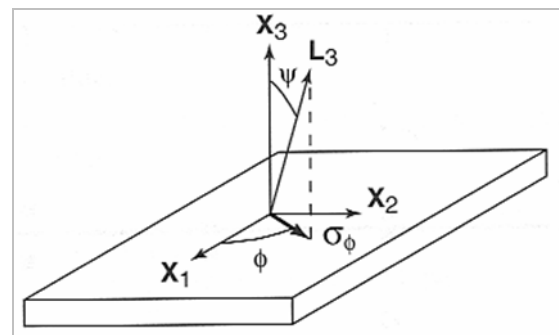
Fig. 1.: Formation of rolling texture in hexagonal alloy (source: <http://phys.org/news/2013-03-room-temperature-formability-damping-magnesium-alloy.html>)

Amennyiben az alakított fémes szerkezetet kellő mértékű hőhatás éri, akkor szilárd állapotban elindul a mikroszerkezet átrendeződése (újrakristályosodása) és az alakváltozás nyomai megszűnnek, a fém kilágyul. Általában a szerkezet újraépítkezése sem izotróp módon megy végbe, hanem a könnyen növekedő kristálytani síkok mentén, vagyis az így kapott szerkezet is anizotróp lesz. Ez az újrakristályosodási textúra (Engler & Randle 2010). A három féle textúrákép különböző, és adott ötvözetcsaládra, rács típusra, alakítási módra egyértelműen jellemző. A textúra kialakulása a diffrakciós szórás kép intenzitás eloszlását jellegzetesen módosítja. A textúra jellemzésére elterjedt módszer az inverzpólus ábra, pólus ábra vagy ODF (Orientation Distribution Function) ábrázolás (Engler & Randle 2010, Kocks et al. 1998).

A képlékeny alakítást mindig kíséri rugalmas alakváltozás is, mely az erőhatás irányának megfelelően torzítja a kristályrácsot, megváltoztatja a rácssíksorozat távolságát, és így a diffrakciós maximumok helyét a szórás képen. Ez a rácsorzulás, a ható erő megszűnése után is megmaradhat, azt mondjuk, hogy az anyag maradó feszültséggel terhelt. A fémes szerkezetek hidegalakítást követő újrakristályosodási folyamatát befolyásolja az alkalmazott alakítás mértéke, a mikroszerkezet, a kémiai összetétel és leginkább az alkalmazott hőmérséklet. Ha a hőmérséklet az olvadáspont kb. 40 %-a felett van, akkor a folyamat végbemenetelének adott a feltétele. Ebben az esetben a maradó feszültségek leépülnek, az alakítás okozta kristálytani anizotrópia megszűnik. Ennek megfelelően a maradó feszültség jellege, előjele, iránya, nagysága szintén egyértelműen utal az alkalmazott képlékenyalakítási vagy hőkezelési körülményekre.

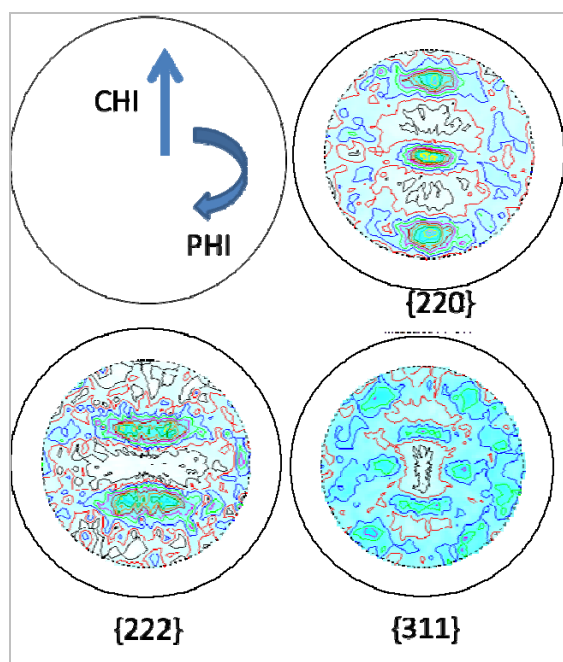
A maradó feszültség röntgendiffrakciós vizsgálatának módja

A maradó feszültség vizsgálatára alkalmazható módszerek igen sokfélék lehetnek, de mennyiségi jellemzést csak a diffrakciós módszerek adnak (Toten 2008). A röntgendiffrakciós vizsgálati technikák akár üzemi, vagy akár terepi körülmények között is megvalósíthatók. A diffrakciós vizsgálat elve, hogy a maradó feszültség a fémes anyagban a fémrács rácspontjaiban elhelyezkedő fém atomtörzsek egyensúlyi helyzetből való kimozdulását eredményezi. Kristálytani megközelítésben ez azt jelenti, hogy változik a fémes anyag elemi cella mérete, köbös rendszerben a rácsparamétere. Mivel az anyagban a rugalmas maradó rácsfeszültség hatására a rácssíkok távolsága megváltozik, ennek a változásnak a mérésével visszaszámolható a feszültség. Tehát maradó feszültség meghatározásakor a mérésnél alkalmazott röntgensugárzás hullámhosszának ismeretében (λ) az adott $d\{hkl\}$ rácstávolság változás okozta Bragg-szög (θ) eltolódását mérjük. A **2. ábra** szerinti lemez alapanyagon a tetszőlegesen választott $\sigma\phi$ irányú feszültség meghatározásakor abba a problémába ütközünk, hogy nem tudjuk megmérni az ilyen irányú rácsorzulást, mivel a röntgensugárzás csak igen kismértékben hatol be a vizsgálati anyagba. Ezt az ellentmondást a $\sin^2\psi$ módszer alkalmazásával lehet feloldani. A módszer lényege, hogy a kiválasztott síksorozat távolságának változását az ábra szerint X_3 , illetve azzal ψ szöget bezáró L_3 irányból ($d_3, d\psi$) határozzuk meg és ennek, valamint a vizsgált anyag rugalmassági modulusa (E) és Poisson száma (ν) ismeretében a keresett irányú feszültség számítható (Kravitz 2001). A feszültség az összefüggésnek megfelelően lehet pozitív és negatív előjelű is, első esetben húzó, míg második esetben nyomó feszültségről beszélünk.



2. ábra: $\sigma\phi$ irányú feszültség meghatározása lemez felületén

Fig. 2.: Geometry for biaxial stress measurements in $\sigma\phi$ direction



3. ábra: Hengerelt Ag lemez pólusábrái és a CHI, PHI szögek értelmezése

Fig. 3.: Measured pole figures for rolled Ag and the identification of CHI and PHI angles

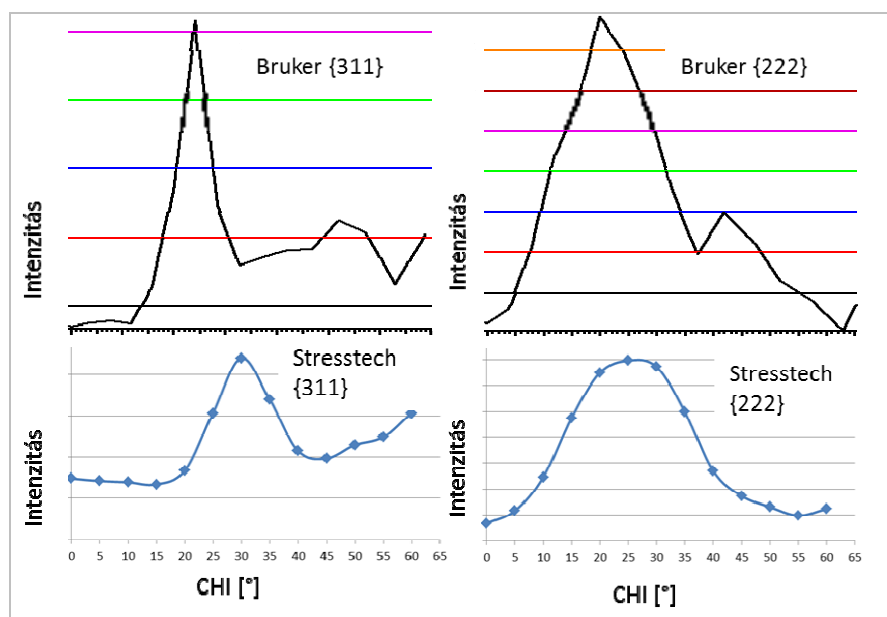
A ψ döntés megvalósítására, kétféle lehetőség van, vagy a pordiffraktométer rendelkezik a minta döntését megvalósítani tudó mintatartóval (Euler bölcsovel), vagy a diffraktométert magát kell dönteni. A Miskolci Egyetem, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében mindkét megoldást nyújtani tudó eszköz működik. Jelenlegi vizsgálatainkhoz egy Stresstech Xstress 3000 G3R röntgen-diffraktométert használtunk. A berendezés direkt maradó feszültség mérésre fejlesztették, a minta mozgatása helyett a nyugalomban lévő minta felett dönti a röntgensövet és a detektor rendszert. A maradó feszültség vizsgálatokat Cr sugárforrással végeztük az ezüst {311} vagy {222} reflexiójának eltolódásából. Mérési adatokat 5-9 döntési pozícióban, 1-3 mm sugárfolt átmérővel végeztük. A számításhoz a következő anyagi konstansokat használtuk: E: 83 000 MPa; ν : 0,37.

A mérési eredmények értékelésénél mindig szem előtt kell tartani azt a tényt, hogy a mért érték a besugárzott térfogatra vonatkozik és a vizsgálat során alkalmazott döntési irányban lép fel. Ezért ha eloszlást akarunk meghatározni, akkor több pontban is mérünk kell.

A textúra röntgendiffrakciós vizsgálatának módja

A kristálytani textúra vizsgálata során a kiválasztott {hkl} síksorozat által diffraktált nyaláb

intenzitásának térbeli eloszlását térképezzük fel, a minta orientációjának változtatásával (forgatás, PHI + döntés, CHI). A mérés során a mintát ki kell döntenünk a fókusz síkból. Az ebből származó defókuszálási hibát ugyanolyan alapanyagból készített por mérésével korrigáljuk. Az egyes kristálysíkok intenzitásának térbeli eloszlását pólusábrákkal szemléltetjük. A pólusábrákon az intenzitás eloszlását szintvonalakkal, illetve szűrkeségi szintekkel jelöljük. Amennyiben a CHI=0° döntéshez tartozó vizsgálati sík, továbbá egy kitüntetett irány definiálható a minta koordináta-rendszeréhez, félkvantitatív eredményt kapunk. Pólusábrákkal általában hengerelt lemezek orientációs viszonyait adjuk meg. Hengerelt lemez vizsgálata során CHI=0° döntéshez tartozó vizsgálati sík a hengerlési sík, továbbá ismert a minta hengerlési iránya. A kapott pólusábrákon ehhez a koordináta-rendszerhez képest lehet értelmezni az egyes {hkl} reflexiók térbeli eloszlását. Hengerelt lemez pólusábráján 12 óra irányába mutat a hengerlési irány, a döntés értéke a pólusábra középpontjától sugárirányban kifele haladva CHI=0°-tól 75°-ig növekszik, az elforgatás értéke PHI=0°-tól 360°-ig az óramutató járásával megegyező irányban növekszik. Hengerelt Ag lemez pólusábráit és a CHI, PHI szögeket mutatja a **3. ábra**. A pólusábrákat Euler bölcsovel kiegészített Bruker D8 Advance berendezéssel készítettük. Amennyiben nem áll módunkban síkfelületet létrehozni a mintán, továbbá a mintánkon nem ismerjük a hengerlési síkot és hengerlési irányt, vagy nincs mód a minta mozgatására vizsgálat közben, akkor a textúra félkvantitatív vizsgálata nem lehetséges. A kristálytani textúra jelenléte látható már egy mintahelyzetben készített teljes diffrakciós görbén is. Ha lehetőség van a minta vizsgálatára több döntési pozícióban is, akkor a teljes pólusábra meghatározása nélkül is kapunk a textúra jellegéről információt. A Stresstech Xstress 3000 G3R berendezéssel végzett vizsgálatok a roncsolásmentes jellegével, továbbá a döntés megoldásával különösen alkalmassá teszi a berendezést régészeti leletek maradó feszültség és textúra vizsgálatára is. A különböző döntési pozíciókban felvett reflexiókkal ugyanis a pólusábra egyes részeit rögzíthetjük. A berendezés különleges mérőfej-konfigurációjának (ω -mód) alkalmazásával a döntési tartományt akár a CHI=0°-75° tartományra is kiterjeszthetjük. Erre mutat példát a **4. ábra**, ahol is két síksorozat CHI=0°-nál lévő CHI=0-70°-os pólusábra metszetét látjuk a textúra vizsgálatra kifejlesztett Bruker és az általunk textúra vizsgálatra alkalmazott Stresstech berendezéssel. Az intenzitás csúcsok megjelenési helye közel azonos a kétféle módszernél.



4. ábra:
Hengerelt Ag lemez
{311}, {222} reflexiók
pólusábráinak 12-óránál
lévő CHI metszete a
kétféle módszerrel
meghatározva

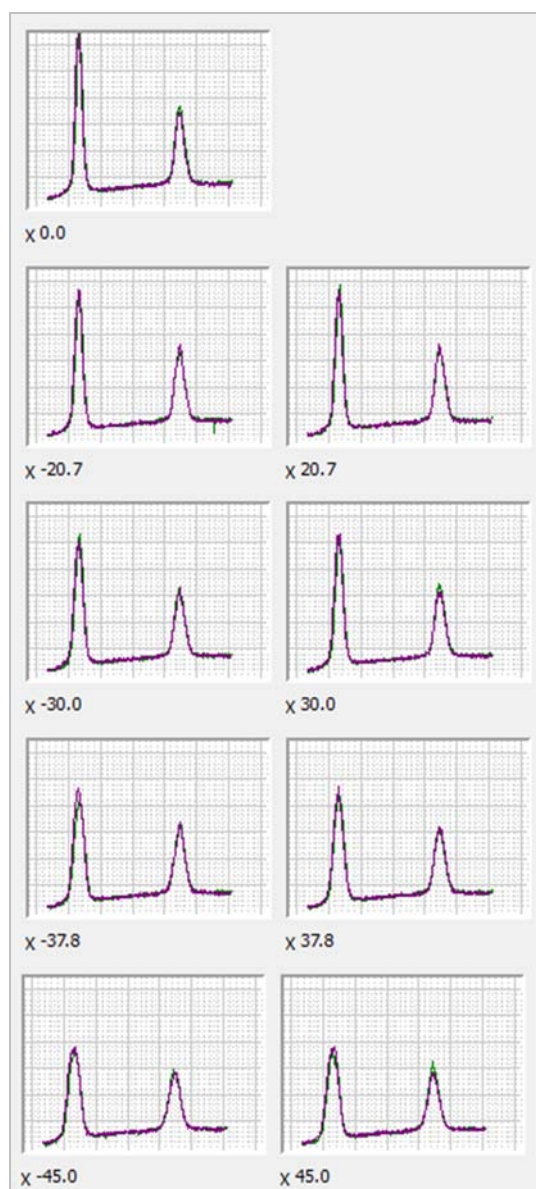
Fig. 4.:
CHI section of measured
{311} and {222} pole
figure for rolled Ag at
PHI=0 position
determined by two
methods.

Az itt bemutatott vizsgálataink célja a fém tárgy technológiai folyamatai által a rácsszerkezetben létrehozott változások, úgymint polikristályos anizotrópia (textúra) és rugalmas torzulás (rácstorzulás) mértékének és jellegének a nagyfelbontású meghatározása a minta roncsolása nélkül. A rácsszerkezetben bekövetkező változások megállapítása alapján a fémre ért technológiai jellemzőkre (alakítás jellege, mértéke, iránya, hő effektus stb.) lehet következtetni. A vizsgálatokhoz tudatosan részben ismert technológiájú mintákat választottunk, vagyis a bemutatott eredmények az általunk újszerűen alkalmazott módszer validálását jelentik elsősorban. A vizsgálati minták ennek megfelelően: izotróp ezüst por, hengerelt ezüst lemez, öntött és részben felületi megmunkáláson átesett ezüst érme, és római kori ezüst fibula.

A vizsgálati eredmények

A különböző tárgyak vizsgálati eredményeit a tárgy, a mérési hely képi bemutatásával, a mérési irány és a számszerű feszültségérték megadásával, valamint a különböző ($-45^\circ \dots +45^\circ$) döntési pozíciókban rögzített ezüst {311} és {222} reflexiók képével adjuk meg. Mindkét reflexiót két helyzetérzékeny detektor rögzíti. Összehasonlításként feszültségmentes (10 ± 6 MPa) ezüst porról készült felvételeket mutat az **5. ábra**. A két detektor (zöld: A, lila: B) teljesen azonos jelet ad, és a döntési pozíciók (χ) sem változtatják meg a diffrakciós csúcsok szimmetriáját, intenzitás arányát. Gondos megfigyelő észreveszi, hogy a $\chi=0^\circ$ pozícióhoz képest az abszolút intenzitások kis mértékben csökkennek, ahogy a döntési szögek nőnek. Ez a döntésből adódó defokuszálás eredménye, mely a vizsgálati módból adódik és

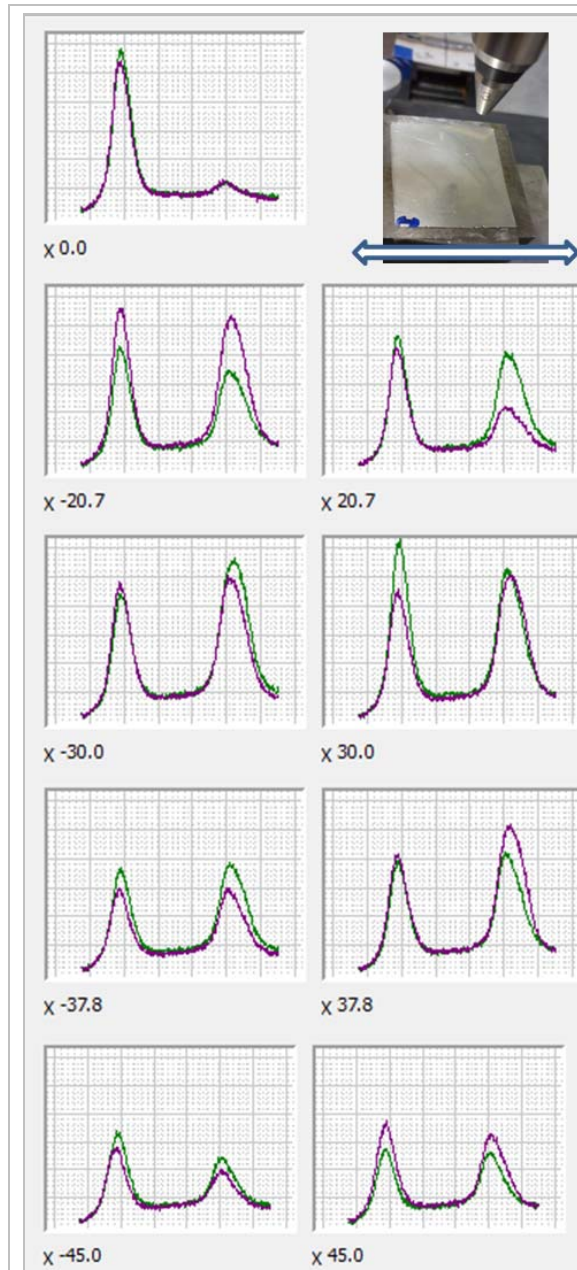
sokkal kisebb effektus, mint amit a technológiai műveletek okoznak. Mindkét eredmény azt mutatja, hogy a por teljesen izotróp. A **6. ábra** mutatja, hogy a hengerlés milyen drasztikus változást idézett elő kompakt ezüst mintában. A vizsgálat iránya ebben az esetben a hengerlési irány. Az intenzitás arányok erősen változnak a különböző döntési pozíciókban és a két detektor által rögzített görbe eltérő egy adott döntés esetén, vagyis az alakítási textúra hatását látjuk. A feszültség ennek megfelelően nagy szórást mutat, de egyértelműen pozitív előjelű, vagyis húzó (71 ± 35 MPa), ami teljesen logikus a hengerlési irányban. Az intenzitások változása folyamatos a döntési szög növelésével. Az intenzitás ilyen mértékű folyamatos változása összhangban van a képlékenyalakítás során kialakult szemcseszerkezettel. Alakítás hatására ugyanis a kristályok befordulnak a kitüntetett irányokba, viszont a kristályok szorosan illeszkednek, a szemcsék nem egyenként, hanem összekapcsolva fordulnak be az alakítás során. Ennek az eredményeként a pólusábrákon olyan lokális maximumok alakulnak ki, melyek folyamatos intenzitás-növekedéssel érik el a maximális értéket. Ha ilyen szerkezetről készítünk felvételt több döntési pozícióban, a detektált intenzitás folyamatos növekedéssel éri el a maximumot. Az erre merőleges irányú vizsgálat szintén erős textúra jeleget, viszont negatív előjelű, vagyis kis értékű nyomó feszültséget adott (-54 ± 48 MPa), ami az alakítás jellegéből adódóan szintén logikus. A következő vizsgálati darabunk egy öntött, majd egyes részein különböző mértékű felületi megmunkálást (csiszolást, polírozást) kapott ezüst érme.



5. ábra: Normálfeszültség 10 ± 6 MPa feszültségmentes, izotróp Ag por {311} és {222} reflexiói a $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ döntési pozícióban, zöld vonal: A detektor, lila vonal: B detektor

Fig. 5.: Normal stress: 10 ± 6 MPa, stress-free, isotropic Ag powder {311} and {222} peaks at $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ tilting positions. Green line-detector A, purple line-detector B

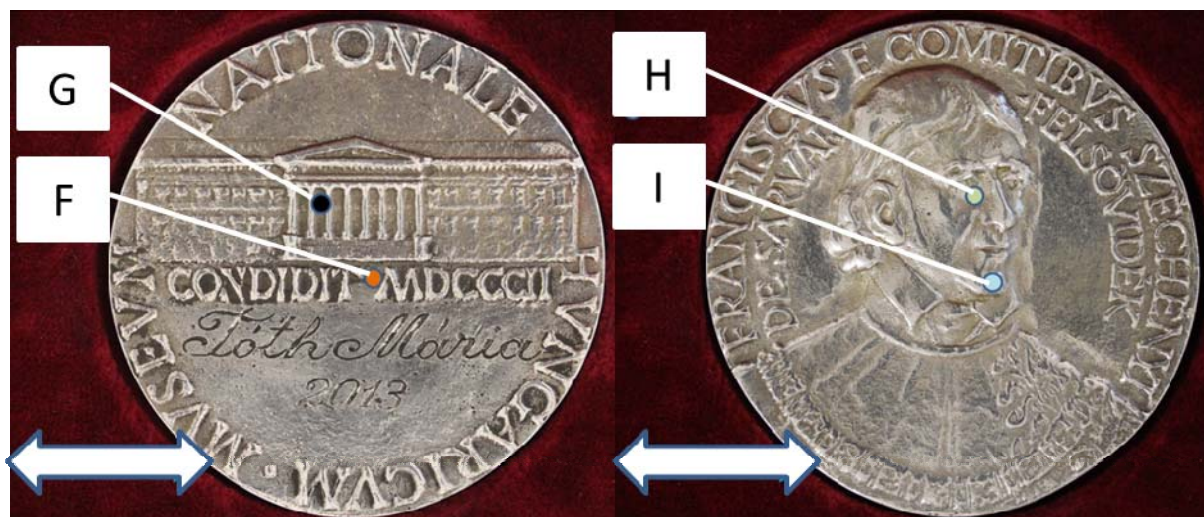
Az itt bemutatott négy mérési pont (7. ábra) eltérő állapotú felületet mutat. A sztereomikroszkópos vizsgálatok szerint az „F”, „G”, „H” mérési pontokban egy inkább öntött felület látható, míg az „I” erősen polírozott rész. Az „F” pont kismértékű felületi megmunkálása is valószínűsíthető. A leginkább érintetlen öntött felület a „H” pont. Az oszlopcsarnok közti „G” pont egy szintén érintetlen öntött, de erősen tagolt rész. A vizsgálat irányát fehér nyilak jelzik. A felületi hatások jól megjelennek a mérési eredményekben is (8. ábra).



6. ábra: Normálfeszültség 70 ± 50 MPa hengerelt Ag lemez reflexiói hengerlési irányban a $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ döntési pozícióban, zöld vonal: A detektor, lila vonal: B detektor, nyíl jelzi a hengerlés és a mérés irányát

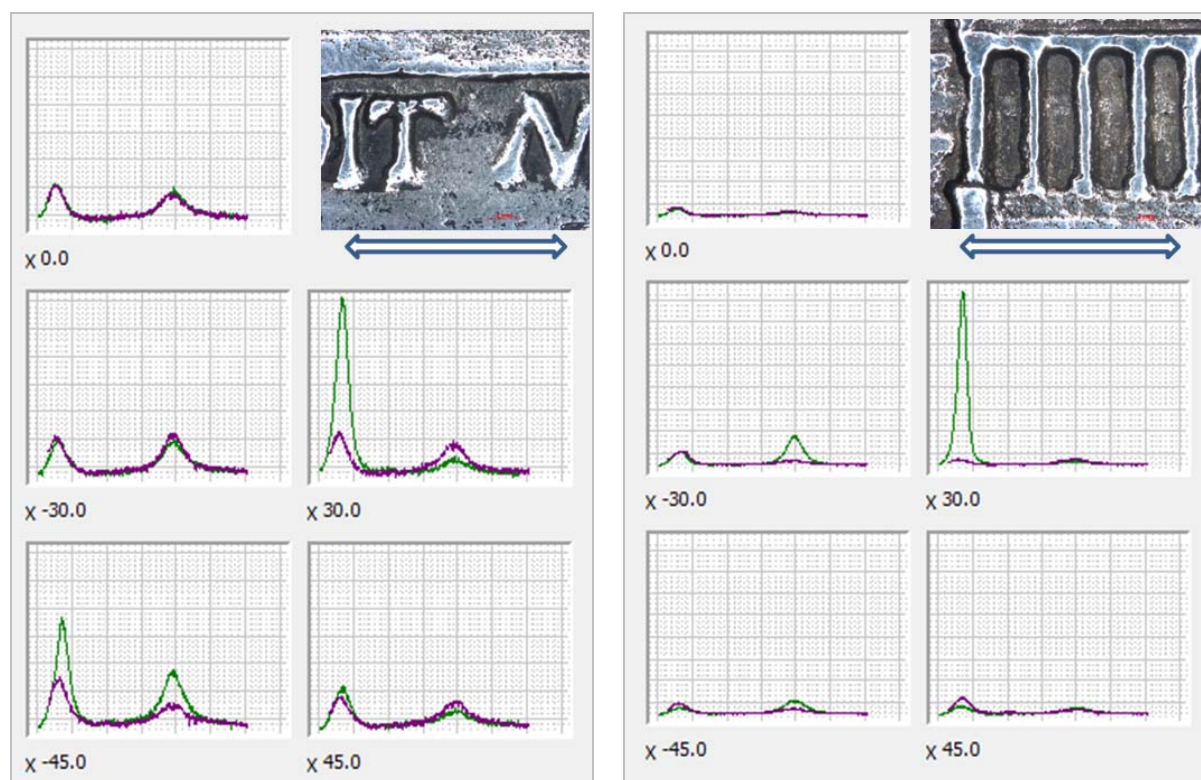
Fig. 6.: Normal stress: 70 ± 50 MPa, rolled Ag peaks in rolling direction (arrow) at $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ tilting positions. Green line-detector A, purple line-detector B

Az öntött felületeken az öntési textúra teljesen sztochasztikusan változtatja az intenzitás értéket, a döntés függvényében. A legerősebb a hatást a „G” pontban láthatjuk, ahol a vékony falhatás okozta erőteljes irányítottságot látjuk. A polírozott felületen az intenzitásarányok változása egyenletesebb.



7. ábra: Az ezüstérme vizsgálati helyei és a mérés irányát jelző nyilak

Fig. 7.: Measured points and direction on the silver coin

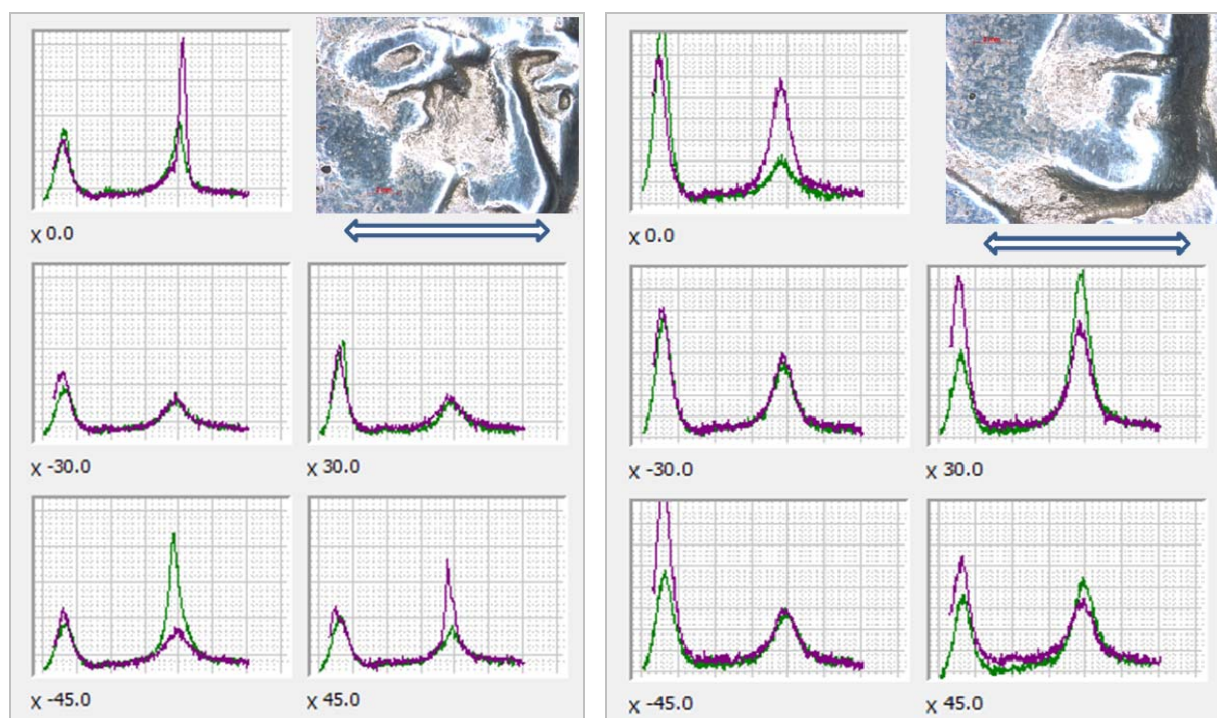


8. ábra/a-b: Az ezüstérme „F”, „G”, „H” és „I” pontjaiban felvett reflexiók a $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ döntési pozícióban, zöld vonal: A detektor, lila vonal: B detektor és mért feszültségértékek

a) F pont, normál feszültség -21 ± 29 [MPa], b) G pont, normál feszültség -135 ± 34 [MPa],

Fig. 8./a-b: Peaks and stress data of „F”, „G”, „H” and „I” measured points on the silver coin, at $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ tilting positions. Green line-detector A, purple line-detector B

a) F point normal stress -21 ± 29 [MPa], b) G point normal stress -135 ± 34 [MPa]



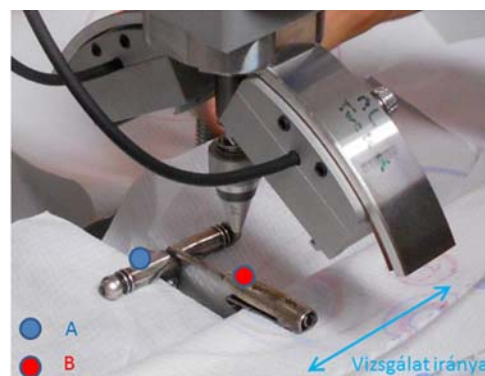
8. ábra/c-d: Az ezüstérme „F”, „G”, „H” és „I” pontjaiban felvett reflexiók a $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ döntési pozícióban, zöld vonal: A detektor, lila vonal: B detektor és mért feszültségértékek

c) H pont, normálfeszültség 168 ± 85 [MPa], d) I pont, normálfeszültség -154 ± 8 [MPa]

Fig. 8./c-d: Peaks and stress data of „F”, „G”, „H” and „I” measured points on the silver coin, at $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ tilting positions. Green line-detector A, purple line-detector B

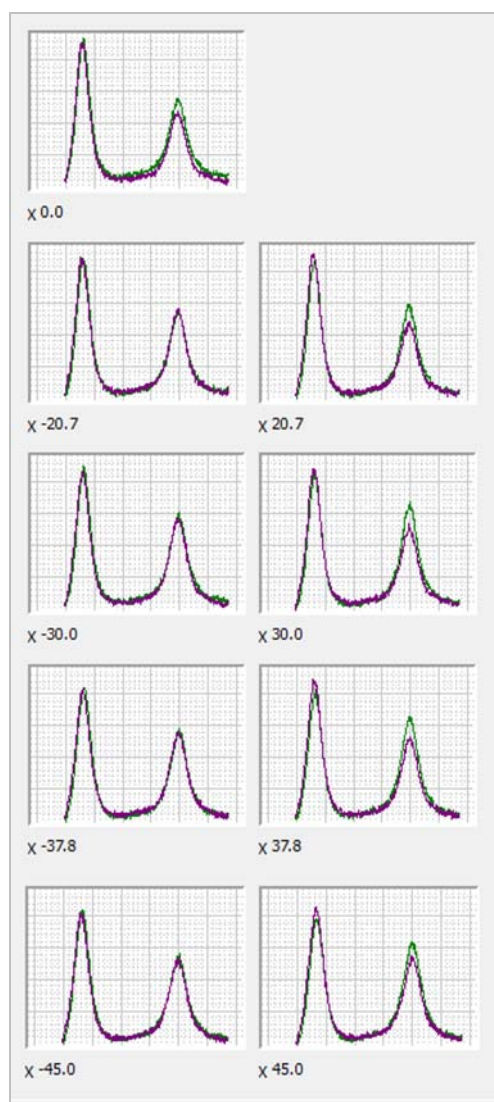
c) H point normal stress 168 ± 85 [MPa], d) I point normal stress -154 ± 8 [MPa]

Itt mértük a legnagyobb nyomó feszültséget és a legkisebb szórást is, ami jól bizonyítja a felületi nyomó-polírozó művelet hatását. Húzófeszültséget egyedül a „H” pont mutat, ez a felületi morfológiából adódó hőelvonás irányának a hatása. A következő próbadarabunk merőben más technológiával lemezből készült ezüst hagymagombos fibula (Ltsz.: MNM RR 54.33.55. lelőhelye: ismeretlen). Az ezüst hagymagombos fibula kereszttagja hatszög keresztmetszetű, végein kerek gombokkal. Magasra ívelő kengyelének gerincén és tűtartójának felületén, niellőberakással hangsúlyozott háromszögű tagokból álló sorminta fut végig. A kengyelen a niellőberakás nagy része kiesett. Tűtartójába cső alakú tokot toltak be, amely megakadályozta a tű kicsúszását. Keltezése: Kr. u. 3. század második harmada. A **9. ábra** mutatja a tárgyat vizsgálat közben a mérési helyekkel és a feszültségmérési iránnyal.



9. ábra: Ezüst fibula mérés közben a mérési pontokkal és vizsgálati iránnyal

Fig. 9.: Measured points and direction on the silver fibula



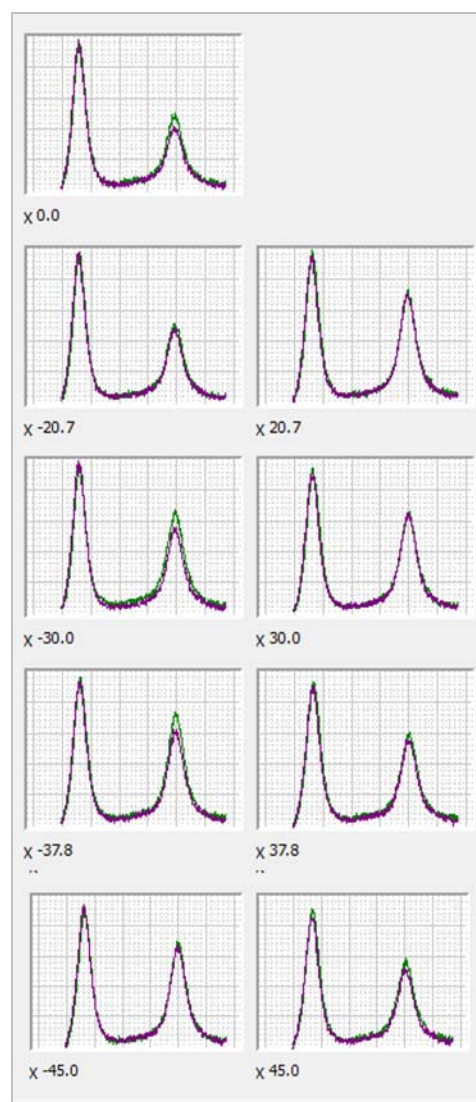
10. ábra: Ezüst fibula mérési eredményei „a” és „b” pontjaiban felvett reflexiók a $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ döntési pozícióban, zöld vonal: A detektor, lila vonal: B detektor és mért feszültségértékek

a) A pont, normálfeszültség: -67 ± 6 [MPa]

Fig. 10.: Peaks and stress data of „a” and „b” measured point on the silver fibula, at $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ tilting positions. Green line-detector A, purple line-detector B

a) „a” point normal stress -67 ± 6 [MPa]

Az „A” és „B” pontokban felvett reflexiókon látható (10. ábra), hogy mind a {311}, mind a {222} reflexiók intenzitása független a döntési pozíciótól. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált fibula mindkét része kristálytanilag izotróp (textúramentes). Mivel a fibula textúrájától mentes, a fibula nem készülhetett öntéssel.



10. ábra: Ezüst fibula mérési eredményei „a” és „b” pontjaiban felvett reflexiók a $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ döntési pozícióban, zöld vonal: A detektor, lila vonal: B detektor és mért feszültségértékek

b) B pont, normálfeszültség: -91 ± 2 [MPa]

Fig. 10.: Peaks and stress data of „a” and „b” measured point on the silver fibula, at $\chi = -45^\circ \dots +45^\circ$ tilting positions. Green line-detector A, purple line-detector B

b) „b” point normal stress -91 ± 2 [MPa]

A mérési eredmények szerint a lemez közel izotróp szerkezetű, mely akkor érhető el, ha az alakítás iránya folyamatosan változott (pl. nem hengerléssel, hanem kalapálással történt a lemez vékonyítása), vagy ha az alakítások között hevítéseket is alkalmaztak. Megfelelően változtatva az alakítás-hevítés ciklusokat egy izotóp, egyenletes szemcseszerkezetű alapanyag kapható (Verlinden 2007).

Az ezüstnek, mint a legjobban alakítható fémnek az alakítás közbeni lágyítása esetleg nem is indokolt, de az egyenletes szemcseszerkezet kialakításával a levékonyított alapanyag sokkal kedvezőbben viselkedik majd a formakialakítás, alakadás során. A mért feszültségértékeken látszik, hogy mind az „A”, mind a „B” ponton nyomófeszültség van az anyagban. A „B” pont felvétele hajlított lemeztől készült, a hajlított oldalon. Hajlítás után a hajlított oldalon húzófeszültség marad. Itt a nyomófeszültség jelenléte arra utal, hogy a lemez nem hajlítással kapta meg a végső alakját, hanem formára kalapálással, ráhajlítással.

Összefoglalás

Megállapíthatjuk, hogy az általunk alkalmazott roncsolásmentes röntgendiffrakciós vizsgálatokkal nyerhető információkat (a kristálytani textúra jellege, a maradó feszültség értéke) összehasonlító mérés-sorozattal, illetve más típusú vizsgálatokkal kombinálva és a korra jellemző gyártási és megmunkálási ismeretekkel összevetve a vizsgált minták előállítási technológiai meghatározhatók. Nagy biztonsággal megkülönböztethetők az öntött és alakítást szenvedett térfogatrészek. Jól kimutatható az öntött alkatrészek későbbi megmunkálásainak hatása is, jól meghatározható az igénybevétel (alakítás) iránya és jellege.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt részeként az ARGUM műhely keretein belül valósult meg. Köszönet Dr. Tóth Máriának a Széchenyi emlékérem és Dr. Mráv Zsoltnak az ezüstfibula rendelkezésre bocsátásáért.

Irodalom

- BROOKS C.R. (1982) *Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys*, American Society For Metals, Metals Park, Ohio, 420 pp.
- CHAN R.W. & HAASEN P. (1983) *Physical Metallurgy II*. North-Holland Physics Publishing, Amsterdam, 1957 pp.
- ENGLER, O. & RANDLE, V. (2010): *Introduction to texture analysis*. CRC Press, London, 456 pp.
- KOCKS, U. F., TOMÉ, C. N. & WENK, H.-R. (1998): *Texture and anisotropy*. Cambridge University Press, Cambridge, 676 pp.
- KRAVITZ, A. D., (2001): *Introduction to Diffraction in Material Science and Engineering*. Wiley, New York, 424 pp.
- KURZ, W. & FISCHER, D. J. (1986): *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Publications, Aedermannsdorf, Switzerland, 242 pp.
- LESLIE W.C. (1982) *The Physical Metallurgy of steels*. McGraw-Hill International Book Company, Hamburg, 396 pp.
- TOTTEN, G. E. (2008): *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, Materials Park, Ohio, 499 pp.
- VERHOEVEN J.D. (1975) *Fundamentals of Physical Metallurgy*. John Wiley & Sons, New York, 567 pp
- VERLINDEN B., DRIVER J., SAMAJDAR I. & DOHERTY R.D. (2007) *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*. Elsevier, Amsterdam, 528 pp

