

Központ nélküli röntgendiffraktométerek alkalmazásának kiterjesztése fémtani és technológiai folyamatok jellemzésére

Doktori (PhD) értekezés téziséje

Sepsi Máté, okl. kohómérnök

Kooperatív Doktori Program által támogatott kutatás

tudományos vezető: Prof. Dr. Mertinger Valéria, MTA doktora
kooperatív ipari konzulens: Prof. Dr. Barkóczy Péter, PhD, FUX Zrt.

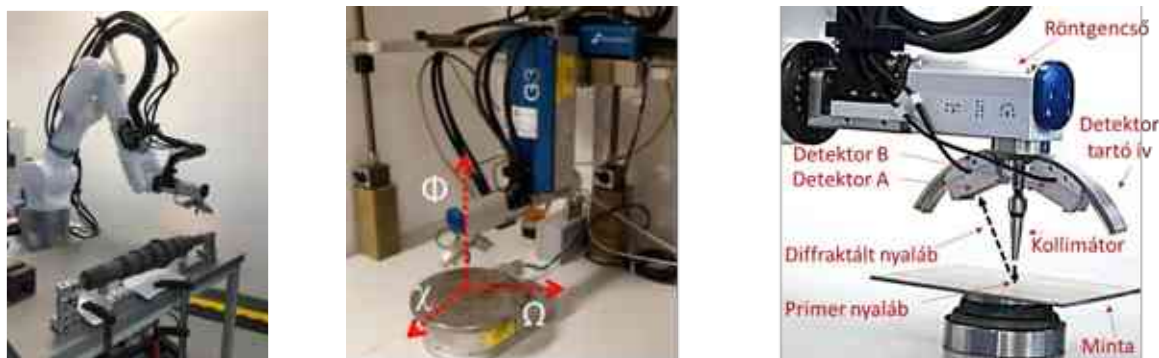
Anyag és Vegyészmérnöki Kar
Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

Miskolc

2024

Bevezetés, célkitűzés

A maradó feszültség röntgendiffrakcióval való mérése egyre elterjedtebb módszer a roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások között, különösen az autó és járműipari alkatrészek gyártása, minőségellenőrzése során. A Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet és a 3DLaboratórium országosan egyedülálló módon két különböző, egy kötőpályán mozgó, mobil kivitelű (Stresstech G3R) és egy robotkarral mozgatott (Stresstech Xstress) központ nélküli diffraktométerrel rendelkeznek, amely eszközöket célzottan roncsolásmentes maradó feszültség vizsgálatra és maradék ausztenit térfogathányad mérésére fejlesztettek ki (1.ábra).



1. ábra A Robot karral mozgatott és kötőpályás központ nélküli diffraktométerek és a mérőfej részei

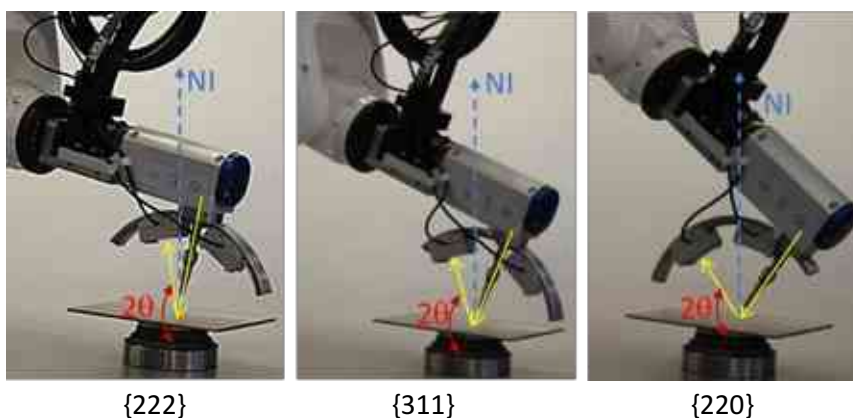
Már másodéves BSc-s hallgatóként bekapcsolódtam az intézet kutatásaiba, tapasztalatot szereztem ezekkel az eszközökkel, három hónapot töltöttem a németországi Rennerodban a Stresstech európai központjában. Számos vizsgálatot végeztem és sikerült az egész szakterülettel mélyebben megismerkednem. Szembesültem azzal a ténnyel, hogy annak ellenére, hogy a vizsgálati módszer szabványosított (pl.: EN 15305:2008), számos olyan fémtani hatás van, amely a számított maradó feszültség értékét befolyásolja, és amit a szabvány nem vesz figyelembe. A legjelentősebb hatások lehetnek a kristálytani anizotrópia (textúra), feszültséggradiens, mikrofeszültségeket okozó inhomogenitások. **A kutatómunkámnak a vezérfonala, hogy ezekre a hatásokra ne problémaként tekintsek, hanem épp ellenkezőleg, használjam ki a központ nélküli diffraktométerek adta roncsolásmentes vizsgálati lehetőséget, és tárjam fel mindazon információkat a feszültség mérőszámán túl, amit az interferencia függvény hordoz. További célom volt, hogy kidolgozzak olyan vizsgálati eljárásokat, amelyeket azok a szakmai közösségek is hasznosítani tudnak, aki ilyen diffraktométerekkel dolgoznak, vagy új lehetőséget nyújtsak azoknak, akiknek a szakterületén a roncsolásmentes vizsgálat elengedhetetlen, mint például az archeometria.** A negyedik tézis megfogalmazásához egy olyan hiba vezetett, amit sokan elkövetnek, ha egy adott szakterületet hosszabb ideig művelnek, azaz, hogy „akinek kalapács van a kezében, az mindenhol szöveget lát” jelenség. A kooperatív szerződéssel támogatott kutatás keretében a maradó feszültség monitorozó eljárást gondoltuk, mint korábban sokszor jól működő módszert a felsővezeték szerelési problémáit előrejelző eljárás alapjául. Azonban kiderült, hogy a feszültség monitorozás ebben az esetben nem oldható meg. Ezért ki kellett mozdulnom a komfortzónámból, és olyan megoldást keresnem, ami túlmutat a bevett maradó feszültség vizsgáló módszerek korlátjain. Négy hipotézist fogalmaztam meg melyek bizonyítására nagyszámú kísérleteket végeztem. Mind a négy hipotézishez kapcsolódóan megfogalmaztam egy-egy tézist.

1 Roncsolásmentes textúra vizsgálat / Első hipotézis

Hipotézisem, hogy maradó feszültség vizsgálatra kifejlesztett központ nélküli diffraktométerek képesek mindazon mozgások megvalósítására, amelyek a textúra vizsgálatához szükségesek. A hagyományos és központ nélküli diffraktométerek eltérő sugármenettel rendelkeznek, de korábbi munkáimban megmutattam, hogy létezik olyan transzformáció, amivel a két módszerrel teljesen egyenértékű pólusábra mérhető. X módban történő méréskor a transzformációra nincs szükség, sőt, ha minimum három nem párhuzamos síksorozat pólusábrája is mérhető, akkor az orientáció eloszlás függvény (ODF) is meghatározható. Központ nélküli berendezések használatával a vizsgálatok roncsolásmentesen elvégezhetők. A roncsolásmentes textúra vizsgálatnak van relevanciája az archeometriában és értékes egyedi alkatrészek vizsgálata során.

A kristályok térbeli irányultságának a véletlentől való eltérését textúrának nevezzük, és annak jellemzése (mérés vagy modellezés) számos területen elengedhetetlen. A képlékenyalakítási folyamatok, vagy a lágýtás általában erős anizotrópiát eredményeznek a polikristályos fémekben. Van olyan eset is, amikor a probléma megfordítva jelentkezik, a textúrából következtetni tudunk a termomechanikai előzményekre. Az archeometria is ezt a megközelítést alkalmazza, amikor a régészeti fémleletek textúrájából következtet az előállítási technológiára [1]. Azokban az esetekben, amikor a tárgyak egyediségük vagy magas előállítási költségük miatt értékesek, a mikroszerkezeti jellemzés a tárgy károsítása nélkül végezhető csak el. Számos úgynevezett roncsolásmentes vizsgálati technika nem igényel mintavételt és képes információt szolgáltatni a mikroszerkezetről, de a textúra roncsolásmentes jellemzésére eddig csak a neutrondiffrakciót használták. Voltak kezdeményezések textúra ultrahanggal történő jellemzésére, de széles körben még nem terjedt el [2], [3]. Felismertük azt a tényt, hogy a központ nélküli röntgendiffraktométerek adhatnak lehetőséget erre a vizsgálati módra. Korábbi kutatómunkáinkban megmutattuk, hogy központ nélküli diffraktométerekkel Ω [4] és módosított Ψ módban [5] bizonyos pólusábráknak egy része, vagyis nem teljes pólusábra mérhető. Ehhez kapcsolódik szabadalmunk is [6].

1.1 X módban történő nem hagyományos textúra vizsgálat módja és validálása

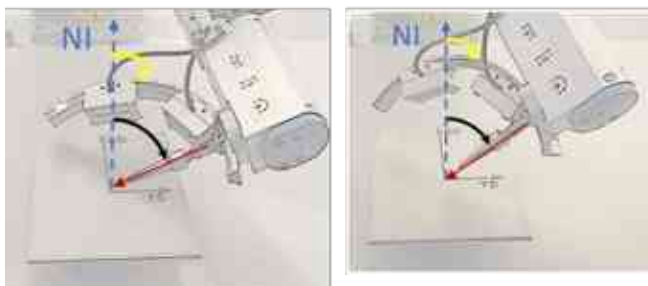


2. ábra Különböző Bragg-szögpozíció robot alapú diffraktométerben alumínium pólusábráinak mérésekor

Amennyiben a központ nélküli diffraktométert robotkar mozgatja, akkor a sugármenet megegyezhet a hagyományos sugármenettel, így a teljes pólusábra meghatározható, sőt a nem robotkaros központ nélküli diffraktométerekhez képest a mérhető Bragg-szögteromány is kiterjeszhető, ezáltal a

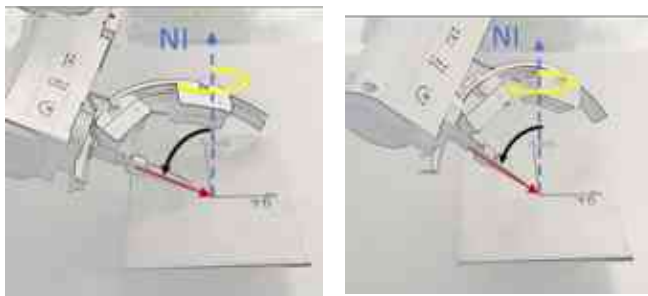
mérhető pólusábrák száma már több is lehet. Ez pedig megnyitja az utat a roncsolásmentes ODF szintézis elvégzéséhez. A 2. ábra alumínium $\{222\}$; $\{311\}$; $\{220\}$ pólusábráinak Bragg-pozícióját mutatja. A pólusábra méréséhez szükséges döntéseket és forgatásokat ezután a X illetve Φ -tengelyek körül végezzük el.

A 3. ábra pólusábra mérését mutatja különböző φ - és χ -szöghelyzetekben.



$\varphi=45^\circ$ és $\chi=60^\circ$

$\varphi=45^\circ$ és $\chi=30^\circ$

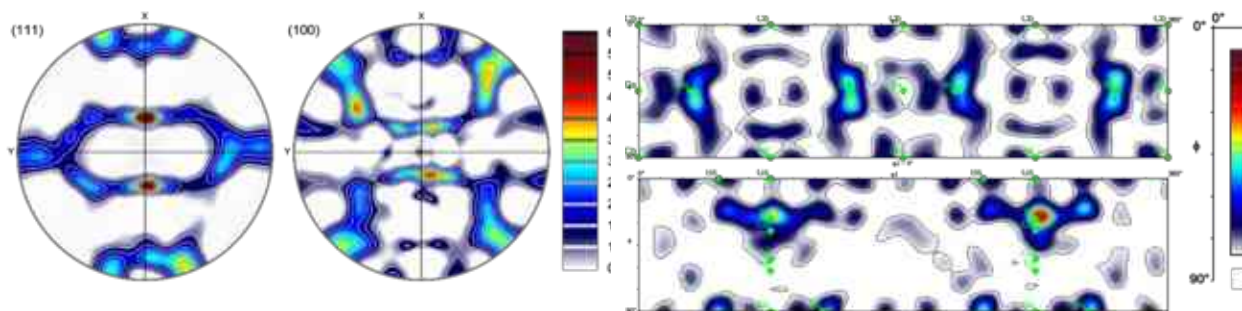


$\varphi=315^\circ$ és $\chi=60^\circ$

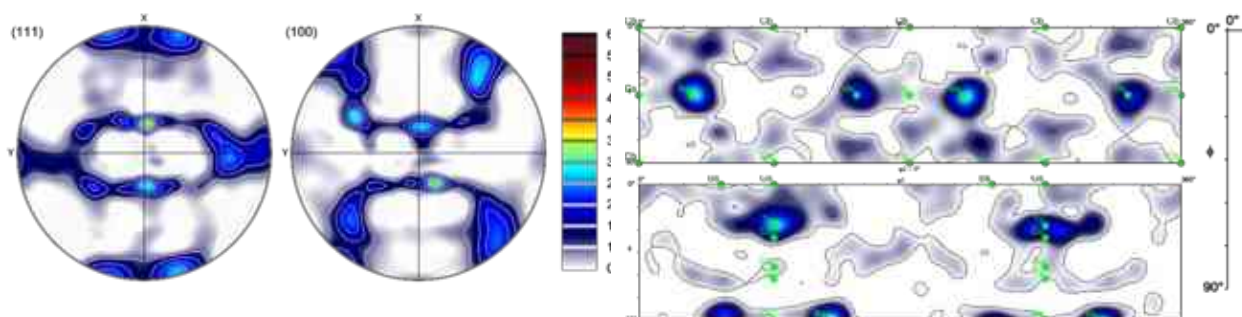
$\varphi=315^\circ$ és $\chi=30^\circ$

3. ábra Négy pillanatfelvétel pólusábra méréséről a robotkarral mozgatott diffraktométerrel

alkalmazásával. A hagyományos mérés során az $\{111\}$, $\{220\}$ és $\{200\}$ pólusábrákat közvetlenül mértük, majd a pólusábrákat az ODF-ből újraszámoltuk. A két módszerből származó ODF-részleteket a 4. ábra mutatja. A két módszer eredményei közötti közvetlen korreláció értéke 0,81 volt, ami a mérés technikában elfogadhatóan magas érték két független textúramérés esetében [8].



robot diffraktométerrel mért adatok alapján



hagyományos diffraktométerrel mért adatok alapján

4. ábra Hidegen hengerelt alumínium lemez ATEX szoftverrel újraszámolt $\{111\}$ és $\{100\}$ pólusábrái és ODF metszetei ($\varphi=0^\circ$ and 45°) m.r.d. egységben; [9]

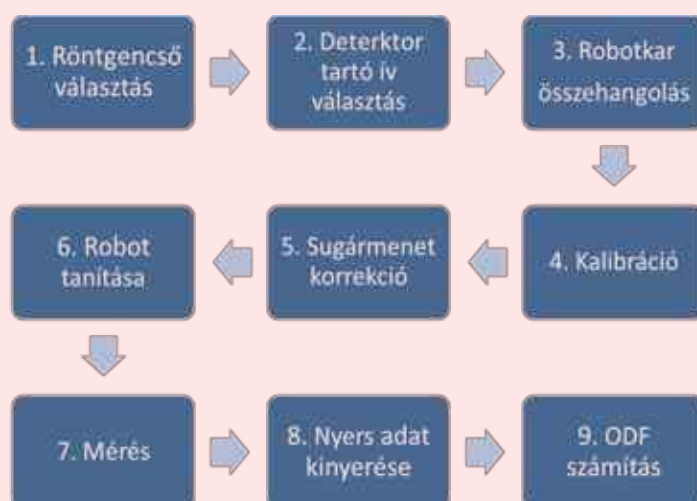
1.2 Első tézis

Sugárforrás	Jellemző fémes fázisok, amelyekre az ODF szintézis elvégezhető központ nélküli diffraktométerrel X módban történő mérésel
Cr	Al, Ti α Nb
Mn	Fe γ , Ti α , Ni, Al, W, Cu, Mo, Nb
Ti	Al
Cu	Fe α , Fe γ , Ti β , Ni, Al, W, Cu, Co ϵ , Co γ , Mo, Cr, Nb
Co	Fe α , Fe γ , Ti β , Ti α , Ni, Al, W, Cu, Co ϵ , Co γ , Mo, Mb, Cr, Nb
Fe	Fe α , Fe γ , Ti β , Ti α , Ni, Al, W, Cu, Co ϵ , Co γ , Mo, Mb, Cr, Nb

Kísérleti úton bizonyítottam, hogy központ nélküli röntgendiffraktométerek alkalmasak a hagyományos technikával egyenértékű mérésre, pólusábra roncsolásmentesen. Robotkarral mozgatott diffraktométerrel, X módban

történő mérés során, a táblázatban szereplő fémeknek, a megadott sugárforrás alkalmazásával legalább három egymással nem párhuzamos síksorozata mérhető, vagyis az ODF szintézis elvégezhető. Ezáltal elsőként tudtam röntgendiffrakció alapú, roncsolásmentes teljes textúra mérést megvalósítani.

Robotkarral mozgatott diffraktométerrel, X módban történő mérés folyamatábrája:



2 Felületi rétegek kvázi roncsolásmentes jellemzése / Második hipotézis

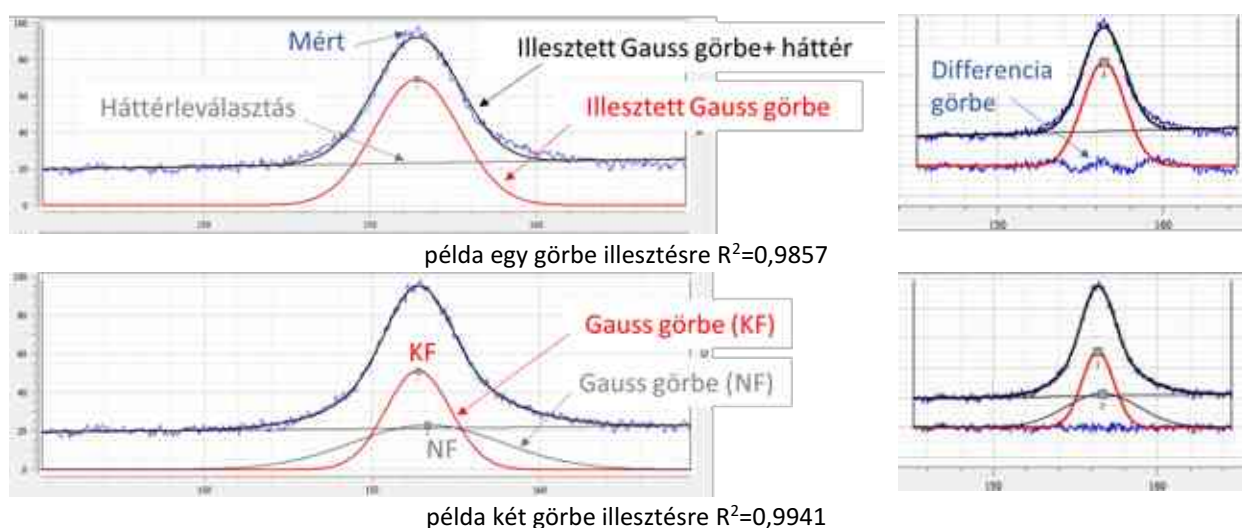
Hipotézisem, hogy mélységi maradó feszültség vizsgálat során, amikor egy alkatrészen kvázi roncsolásmentes vizsgálat történik, az interferencia függvény detektálásakor számos, jellemzően a másod- és harmadrendű feszültségekkel kapcsolatos fémtani hatásokról is információt nyerünk. Ezek az információk minőségi és mennyiségi jellemzésre is alkalmasak minden olyan fémtani változásra, amely ebben a mélységben történik. Ennek megfelelően kvázi roncsolásmentesen lehet ezeket a vizsgálatokat elvégezni.

A hipotézis bizonyítására célzottan kezelt próbatesteket hoztunk létre, melyeken 20-30 lépésben (50-100 μm lépésközzel) mélységi maradó feszültség vizsgálatot végeztünk. A röntgenes eredmények validálását a röntgenes vizsgálat síkjaira merőleges metallográfiai csiszolaton végeztük el. Három a hőkezelési gyakorlatban jelentős fémtani folyamatot vizsgáltunk, úgymint dekarbonizáció, cementálás és a karbonitridálás. Mindhárom folyamat roncsolásos, mintavételezéses metallográfiai módszerrel jól vizsgálható. Az általunk javasolt eljárás újszerűségét az adja, hogy a mélységi maradó feszültség vizsgálat az alkatrész felületét átlagosan

10-15 mm² területen roncsolja, mintakivágás nélkül. Ez kvázi roncsolásmentes eljárásnak tekinthető, különösen, ha az alkatrész olyan részén történik, ami a későbbi megmunkálás (forgácsolás) során eltávolításra kerül, vagy nem teherviselő részen van.

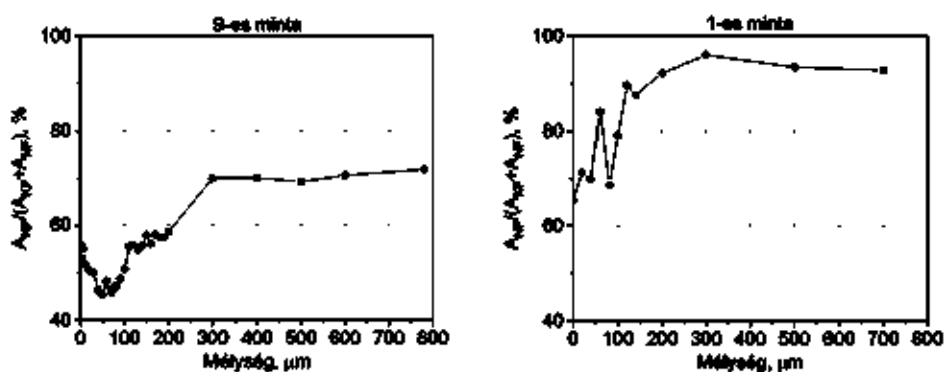
2.1 Dekarbonizációs kísérlet és vizsgálati eljárás

A dekarbonizációs folyamat vizsgálatát Szobota Péter TDK munkájában és Cser Rita MSc diplomadolgozatához kapcsolódóan vizsgáltuk. Az irányítással különböző módon dekarbonizált, edzett minták mélységi feszültségmérését végezték, és a dekarbonizációnak a mélységi maradó feszültség lefutására kifejtett hatását elemezték. Én a mérési eredményeiket tovább értékelve, a lehetséges dekarbonizált rétegvastagság kimutatására koncentráltam. A ferrit fázis különböző mélységben mért {211} reflexióját vizsgáltam. Sok esetben azt tapasztaltam, hogy az értékelő szoftver által alkalmazott Gauss függvény illesztés nem megfelelő mert, a mért görbék gyakran aszimmetrikusak. Ezért kézi illesztést, minden esetben két Gauss görbével történő illesztést alkalmaztam. Erre mutat példát a 5. ábra.



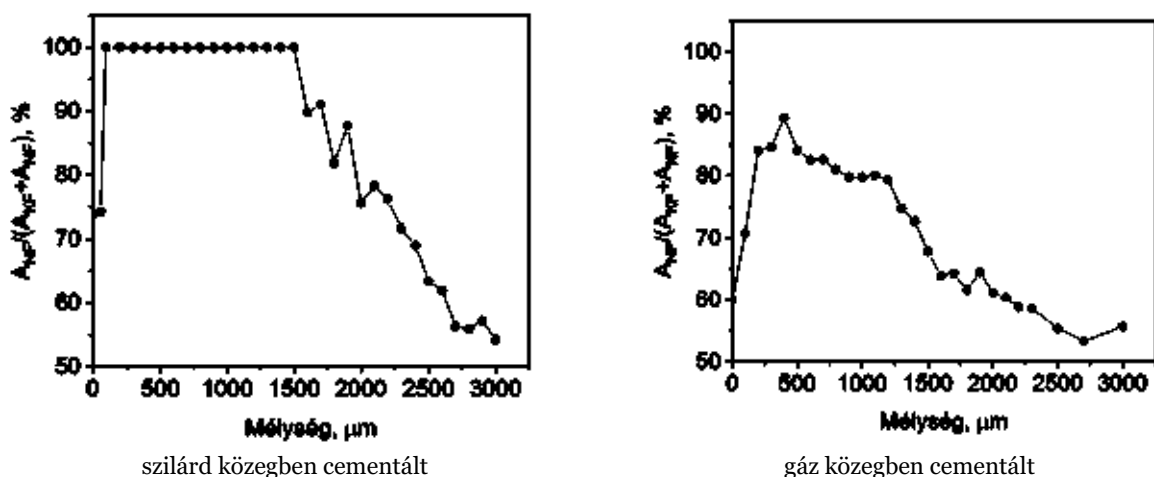
5. ábra Dekarbonizálódott ferrit (martenzit) fázis {211} interferencia görbéjének illesztési problémái; (x- tengely Bragg-szög, y- tengely intenzitás)

Két, egy kevésbé és egy erőteljesebben dekarbonizálódott edzett minta vizsgálatát végeztem el. Az adott mélységi pozícióban az A és B detektor jelére kapott, a 11/11 döntés szerinti adatokat kiátlagoltam. A mért adatokon túl, képeztem a félértékszélesség és az intenzitás adatok szorzatát is, és az így kapott adatot, mint görbére jellemző területadatot (A_{KF} , A_{NF}) alkalmaztam, majd képeztem a terület adatok arányát is (6. ábra).



6. ábra Az erősen (9-es) és kevésbé (1-es) dekarbonizálódott minták illesztéséhez alkalmazott görbének terület aránya a mélység függvényében

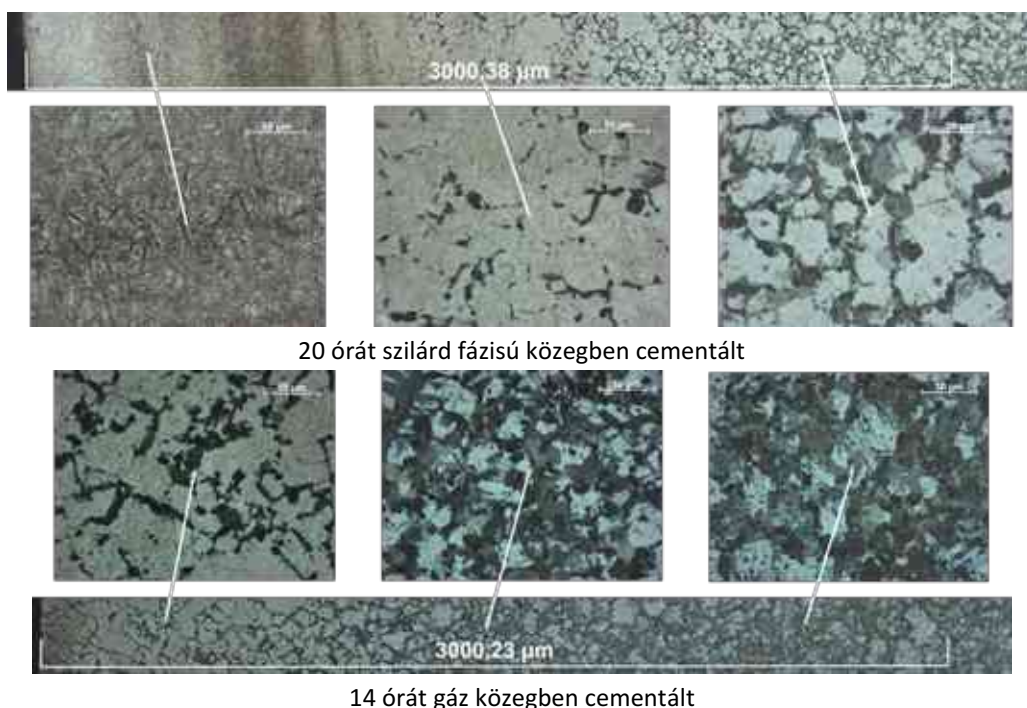
A nagyobb félértékszélességű görbe (NF) aránya az 1-es, kevésbé dekarbonizálódott minta esetében 100 mikrométer mélység alatt már több mint 90%. Ezzel szemben az erősen dekarbonizálódott 9-es mintánál



szilárd közegben cementált

gáz közegben cementált

8. ábra A nagyobb félértékszélességű csúcs terület arányának ($A_{NF}/(A_{KF}+A_{NF})$) változása mint a martenzit arányának változása a mélység függvényében [11]



20 órát szilárd fázisú közegben cementált

14 órát gáz közegben cementált

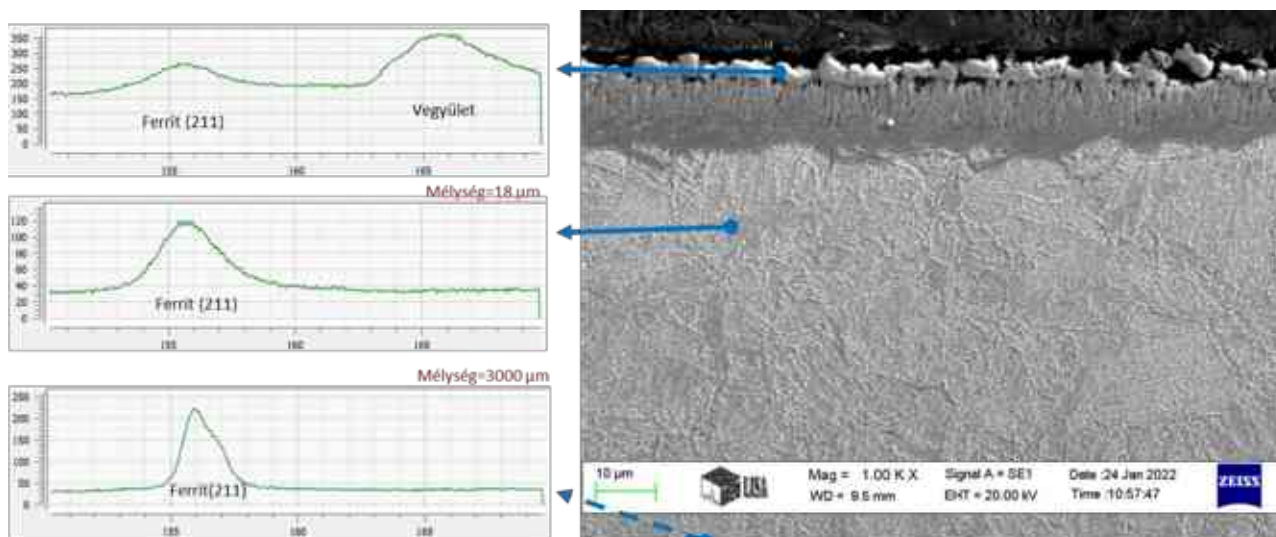
9. ábra A gáz és szilárd közegben cementált minták keresztmetszetéről készült mozaik, és az abból kiragadott fénymikroszkópos felvételek. A próbatetek széle a mozaikképek bal oldalán van [11]

2.3 Karbonitridálási kísérletek és vizsgálati eljárás

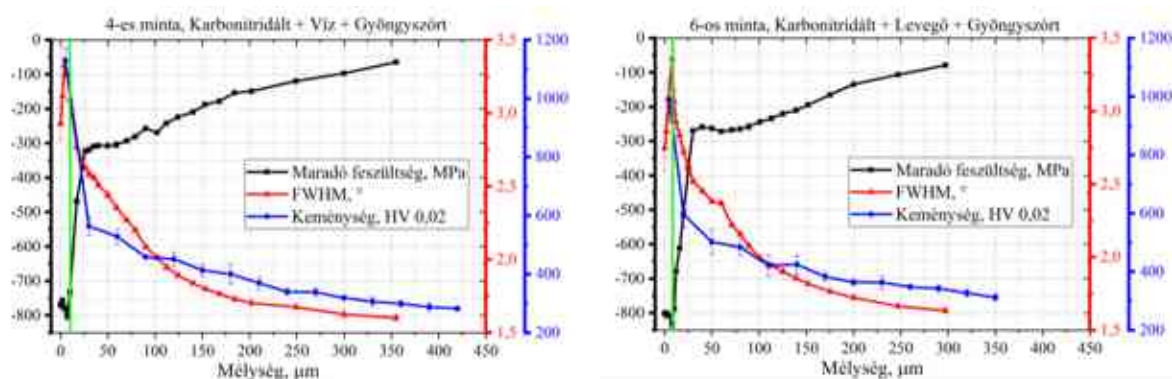
Az ipari gyakorlatban alkalmazott különböző módon karbonitridált próbatesteket a TS Magyarország Kft-től Széll Attila biztosította számunkra. A kutatómunka Szobota Péter 3. TDK és MSc dolgozatához kötődik. A korábbi együttműködésünknek megfelelően Szobota Péter a feszültségállapotokat, én pedig az interferencia függvény egyéb információ tartalmát vizsgáltam. A próbatetek 25 CrMo4 (AISI4130) minőségű acélból készültek, $\varnothing 35 \times 5$ mm-es korongok voltak. Az alapanyagokat előnemesítették 860° -ról való edzést és 630°C -os megeresztést alkalmazva. A próbatetek kimunkálása után kerültek sófürdős karbonitridálásra. A folyamat lépései: 350° előmelegítés, 590°C -on 2 óra karbonitridálás „CR8” – nevű, alacsony cianid tartalmú, kénmentes alapsóval rendelkező fürdőben. A CR8 jelű só elsősorban nátrium és kálium cianidokat és karbonátokat tartalmaz, ez megfelel a SURSULF® technológiának. A próbatetek egy részénél utóoxidációs kezelés és üvegyöngyszórás is történt. Az effektív nitridálási kéregvastagságot a DIN

50190-3: 1979-03 szabvány szerint határoztuk meg. A keménységméréseket Instron Tukon 2100B (Wilson Instruments) Vickers mikrokeménységmérővel végeztük 20 g terheléssel. A kvázi roncsolásmentes mélységi röntgendiffrakciós vizsgálatokat a Stresstech Xstress 3000 G3R diffraktométerével végeztük, a mélységben 5-10 μm -es lépéseket alkalmaztunk. A mérések kiértékelése során Pseudo-Voigt féle függvényillesztést alkalmaztunk parabolikus háttérleválasztással.

Adott állapotú minta mélységi vizsgálata során nyert jellegzetes diffrakciós jeleket a 10. ábra mutatja, megfelelően a roncsolással vett csiszolat SEM felvételén lévő helyekkel. A szekunder elektron SEM felvételen a vegyületi réteg sötét kontrasztot mutat, a diffúziós zóna nem detektálható. Több szerző korreláltatta már a félértékszélesség és a keménység adatok kapcsolatát [12], [13]. Ebben az esetben lehetőséget ad arra, hogy a félértékszélesség adatok alapján is tudjunk szabványos effektív kéregvastagságot meghatározni, de kvázi roncsolásmentesen. Az azonos mélységben meghatározott keménység és félértékszélesség adatok kapcsolata lineáris az összes mintára, a determinációs együttható nagyobb mint 0,94. A mérési eredmények összefoglaló ábráját két mintára mutatja a 11. ábra.



10. ábra Különböző mélységekben mért diffrakciós jelek a kvázi roncsolásmentes maradó feszültség mérés során megfelelően ugyanazon minta roncsolással vett csiszolatának SEM felvételével, (x- tengely Bragg-szög, y- tengely intenzitás)

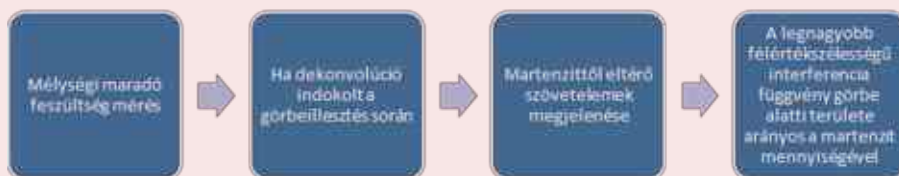


11. ábra Két karbonitridált minta feszültség és félértékszélesség (FWHM) adatainak mélységi változása kvázi roncsolásmentesen meghatározva, valamint keménység adata roncsolásos módon mérve, zöld vonal jelzi a SEM eredmények szerinti vegyületi réteg vastagságot [14]

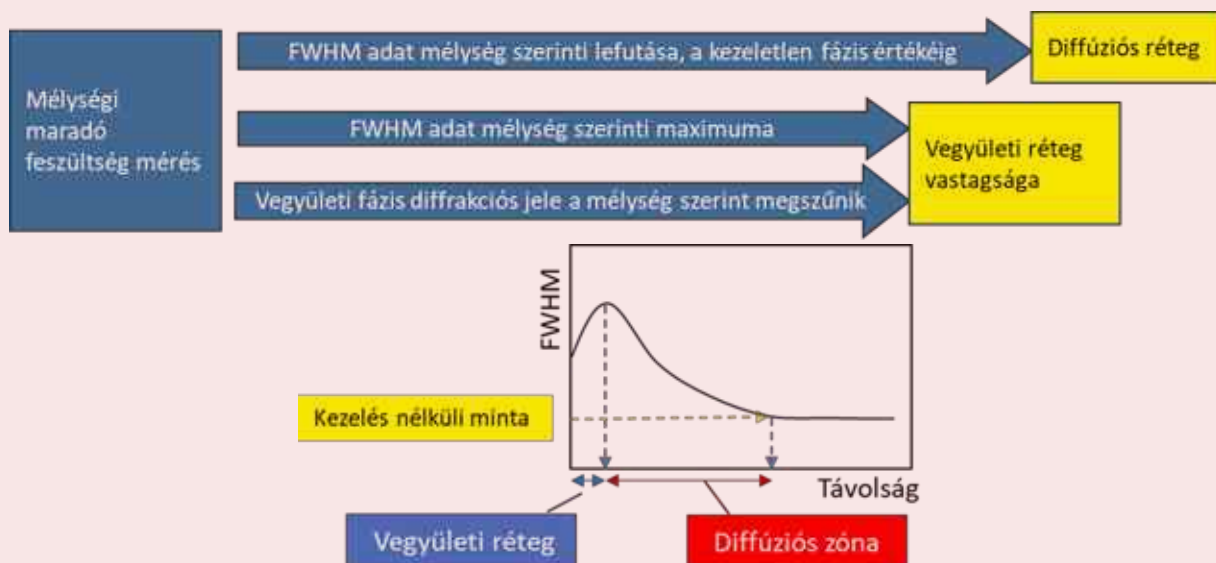
2.4 Második tézis

Kísérleti úton bizonyítottam, hogy mélységi maradó feszültség vizsgálati eljárás során a központ nélküli diffraktométer által nyert interferencia függvény jellemzőiből kvázi roncsolásmentesen meghatározható:

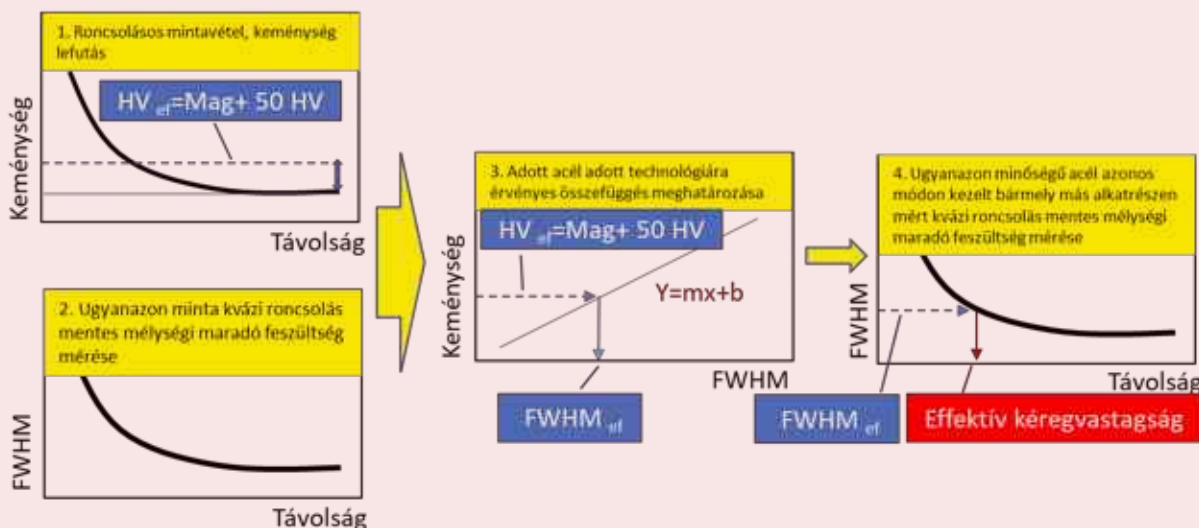
- a) a dekarbonizálódott réteg vastagsága, és a martenzit hányada a cementált rétegben a következő folyamat alapján:



- b) a karbonitridált réteg esetében a vegyületi és a diffúziós zóna vastagsága külön-külön az interferenciafüggvény félértékszélességéből (FWHM) az alábbi módon:



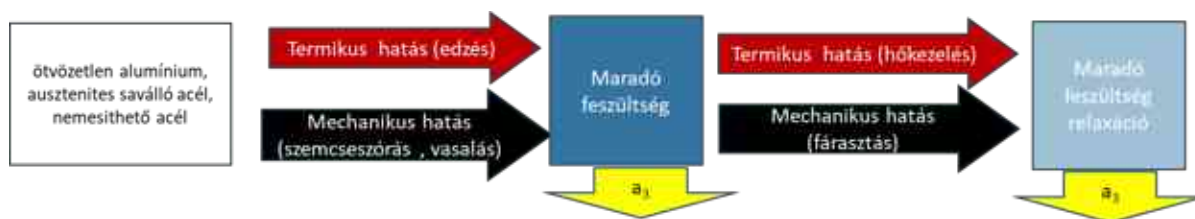
- c) Az azonos ötvözetből, azonos eljárással karbonitridált alkatrészek szabvány szerinti effektív kéregvastagsága, az alábbi módon:



3 Egy csúcs illesztésen alapuló profilanalízis feszültségrelaxációs folyamatok jellemzésére / Harmadik hipotézis

Hipotézisem, hogy a termikusan vagy mechanikusan indukált maradó feszültség relaxációja nem azonos folyamat során megy végbe. A központ nélküli diffraktométer jelének egy csúcs illesztésén alapuló profilanalízise során nyert információk alkalmasak ezen hatások kimutatására.

A hipotézis igazolására három féle ötvözetten termikusan és mechanikusan hoztunk létre maradó feszültséget melyet termikusan és mechanikusan relaxáltattunk, miközben az interferencia függvény a_3 paraméterének változását vizsgáltuk (12. ábra).



12. ábra Feszültségrelaxációs vizsgálatok folyamatábrája

Megalapozott az a feltételezés, hogy az elsőrendű feszültségek leépülésében a rácshibáknak döntő szerepe van, mely rácshibák a harmadrendű feszültségeket okozzák. Ezért a harmadrendű feszültségek monitorozása segít megérteni az elsőrendű feszültségek relaxációs folyamatait. Az elsőrendű maradó feszültség vizsgálatánál a $h(x)$ görbe Bragg-pozíciójának változását, míg a harmadrendű feszültségek esetében a radiális szélesedését vizsgáljuk. Ahhoz, hogy a különböző technológiák által létrehozott maradó feszültségeket és relaxációjukat egy homogén anyag esetén vizsgálni tudjuk, az első és harmadrendű feszültségek változását kell szétválasztanunk. A harmadrendű feszültségek és diffrakciós doménméret vizsgálatának alapjai, több mint fél évszázada lefektették [15], [16], és azóta számos módosított verziója létezik. Azonban mai napig kihívásokkal teli a terület, és nincs egységesen jó megoldás, ha nagy a rácstorzulás és ennek az eloszlása nem Gauss jellegű. Ezen módszerek jellemzője, hogy a profil elemzéséhez több síksorozatról származó reflexiót vizsgálunk, egy nagyon pontosan beállított diffraktométerre van szükség, valamint a diffrakciós jelet az instrumentális szélesedéstől el kell különíteni [17]. A központ nélküli diffraktométerrel történő vizsgálat során azonban csak egy, maximum kettő reflexió vizsgálható a jellemzően $120-170^\circ$ Bragg-szög tartományból, melyet az elsőrendű feszültségek vizsgálatára használunk. Épp ezért ezen módszerek, amelyek több csúcs vizsgálatán alapulnak, nem jöhetnek számunkra szóba. Egy csúcs adatain alapuló eljárásra Keijser és társainak volt egy olyan javaslata, amely azon az elven alapul, hogy ha a rácsfeszültség okozta szélesedés a domináns akkor a görbe Gauss jellegű, ha a kristallitméret, akkor Lorentz [18]. Ez a cikk ihlette az elképzelést, hogy a Gauss és a Lorentz függvények arányát vizsgáljam. A Pseudo-Voigt függvény a Gauss és a Lorentz függvények lineáris kombinációja, ahol a keverési faktor egy paraméterrel (η) adható meg [19]. Egyszerűsége ellenére nagyon jó illeszkedést adó függvények egyike [20]. Mivel a klasszikus profil analízis igényességével nem tudtam a G3R berendezéssel a mért profilt fizikai profilt előállítani, ezért a geometria profilt állandó értéken tartva a keverési paraméter változásának a trendjét vizsgáltam.

3.1 Termikusan és mechanikusan indukált maradó feszültség termikus relaxációja

A vizsgálat során ausztenites korrózióálló acélhengereken (X5CrNi18 10) vasalással (hidegalakítással) és gyors hűtéssel létrehozott nyomó maradó feszültségek termikus relaxációját

vizsgáltuk. A vasalást a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Intézetében végezték el a számunkra. A vasalási paraméterek a következők voltak: szerszám rádiusz: 3 mm; forgási sebesség: 375 rpm; előtolás: 0,0125 mm; erő: 40 N. A kutatómunka Hussein M. Abduljaleel Al-Hraishawi MSc dolgozatához kötődik, akinek konzulense voltam. Hussein a feszültség változását monitorozta, míg én a mért adatokat vizsgáltam profilillesztéssel. A hengeres próbatestek mérete $\varnothing 50 \times 25$ mm volt. A feszültség indukáló hőkezelést villamos fűtésű inert atmoszférájú, saját építésű csőkemencében végeztük 1000 °C-on 0.5 óra hőntartással. A hőntartást követően a hengert tartalmazó csövet vízben hűtöttük le. Mivel az ausztenites acélban fázisátalakulás nem történik a hűtés során, így feltételezhetjük, hogy termikus eredetű feszültségek alakulnak csak ki. A kezeléseket követően meghatároztuk a próbatest palástjának egy pontján a mélységi feszültségprofil. A feszültség mérése után a próbatesteken feszültség csökkentő hőkezeléseket végeztünk az intézet laboratóriumában található elektromos fűtésű, normál atmoszférájú kemencében. A hőkezelési idő leteltével a darabok a kemencével együtt hűltek le. Ezt követően megint felvettünk egy addig érintetlen paláston egy mélységi profilt, majd folytattuk a hőkezelést. Ezen módon ismételtük a feszültségmérés-hőkezelés lépéseket. A termikus relaxációhoz 400 °C-os 6, 12, 24, 96 órás hőkezeléseket alkalmaztunk, végezetül pedig 700 °C-os 6 órásat.

3.2 Mechanikusan indukált maradó feszültség mechanikus relaxációja

Ennek a folyamatnak a tisztázására megvizsgáltam Dr. Cseh Dávid PhD értekezésében közölt mérési adatait is (Pt10 próbatest). 42CrMo4 minőségű 5x5 mm kvadratus próbatestek sörétszórást követően kialakult maradó nyomófeszültség relaxációját vizsgálta fárasztás közben. A fárasztási folyamatot több lépcsőben megszakította, és a próbatestek felületén mért feszültségállapotot monitorozta [21]. Kimutatta a feszültség relaxáció és az alkalmazott fárasztási feszültség szint közötti kapcsolatot. A feszültség relaxáció egyértelműen a mechanikus igénybevétel hatására következett be, ezt a folyamatot mechanikus relaxációnak fogom nevezni, szemben a saját kísérleteinkkel, ahol a relaxáció mindig termikus aktiváció hatására jön létre.

3.3 Harmadik tézis

Nagyszámú, központ nélküli diffraktométerrel történt felületi és mélységi maradó feszültség mérés során nyert interferencia függvény (egy csúcs) illesztési eredménye alapján megállapítom:

- a. Alumíniumon, ausztenites acélon és nemesíthető acélon alkalmazott felülettömörítő (szemcseszórás és vasalás) eljárások során a mechanikusan létrehozott feszültség hatására a Pseudo-Voigt függvény a_3 paramétere növekszik, vagyis az interferencia függvény Lorentz jellege erősödik. Mivel ebben a folyamatban igaz, hogy a krisztallitméret csökkenhet, de az irodalommal ellentétesen az az állításom, hogy a Lorentz jelleg erősödését a rácsfeszültség növekedése okozza.
- b. Ausztenites acélon mechanikusan (vasalással), vagy termikusan (intenzív hűtéssel) létrehozott feszültségek termikus relaxációja során, mely a félértékszélesség csökkenésével jár együtt, a Pseudo-Voigt függvény a_3 paramétere csökken, vagyis a Gauss jelleg erősödik. Mivel ebben a folyamatban a rácsfeszültség és krisztallitméret nem növekedhet, ezért az irodalommal ellentétesen az az állításom, hogy a Gauss jelleg erősödését a rácsfeszültség csökkenése okozza.

c. Nemesíthető acélon mechanikusan (szemcseszórással) létrehozott feszültségek mechanikai relaxációja során, mely a félértékszélesség kezdeti növekedésével majd a csökkenésével jár együtt, a Pseudo-Voigt függvény a_3 paraméterének változása sem monoton. Ennek feltehetően az a magyarázata, hogy a fárasztási folyamat kezdetén megnövekedő vakancia koncentráció hatása, majd a diszlokációk kúszási folyamatának hatása együtt érvényesül.

d. Mechanikusan létrehozott feszültségek termikus és mechanikus relaxációja a Pseudo-Voigt függvény a_3 paraméterében eltérő változást okoz, ez eltérő hibaszerkezet változásra utal, ami közvetetten azt bizonyítja, hogy a termikus és mechanikus relaxáció fémtani értelemben eltérő módon megy végbe.

4 Vezetéksodronyok kosarasodását és szerelési problémáit előre jelző vizsgálati eljárás kidolgozása/kooperatív doktori ösztöndíjjal támogatott kutatás / Negyedik hipotézis

Hipotézisem, hogy alumínium (aluminum stranded conductor - ASC) és ötvözött alumínium (alloyed aluminum stranded conductor - AASC) vezetéksodronyok szerkezeti integritás megbomlásának és feszültség állapotának a monitorozásából olyan vizsgálati eljárás fejleszthető, amivel a sodrott szerkezetben a gyártásból származó maradó feszültségek és alakváltozások kvantitatív módon minősíthetők. Ezen vizsgálati eljárásra alapuló jövőbeni termékszabvány már megoldást kínálhat a vitás helyzetekre.

A maradó feszültség állapot tervezése és kontrolálása a fémek esetében az ipar számos területén ma már elengedhetetlen. A vezetéksodronyoknak a gyártásból, vagy a nem megfelelően végrehajtott szerelésből fakadó kedvezőtlen maradó feszültség állapota a szerkezeti egységet veszélyeztetheti az üzemeltetése során, valamint gondot okozhat telepítés közben. Ilyen fellazuló/kosarasodó külső rétegre mutat példát a 13. ábra.



13. ábra Ötvözött alumínium vezetéksodrony jellemző sodratszerkezet megbomlása

A vonatkozó termékszabvány [22] nem ad egyértelmű módszert és kvantitatív elfogadási kritériumot a vezeték megfelelő (inertness) maradó feszültség állapotára vonatkozóan, ami a gyártó és a vezeték telepítő cég között tisztázná a hiba forrását egy vitás helyzetben. A szabvány a következő módon rendelkezik: az összes acélhuzalnak természetesen a helyén kell lennie a sodronyban, és a vágás helyénél a huzalvégeknek a helyükön kell maradniuk, vagy kézzel könnyen visszahelyezhetőeknek kell lenniük, majd megközelítőleg a helyükön kell maradniuk. Ez a követelmény az elektromosan vezető alumínium huzaljaira is vonatkozik. Az irodalomkutatás során megállapítottam, hogy nem csak a vonatkozó szabvány nem támaszt kvantitatív elfogadási kritériumot, de nincs is igazán megfelelő mérési technika, amivel ezt a sodrott szerkezetek esetében meg lehetne tenni. Az egyedi huzalok, rugók maradó feszültség állapotának vizsgálatára a legkülönbözőbb vizsgálati technikákra találni példát az irodalomban. Vékony, 0,8 mm keresztmetszetű acélhuzalban anyageltávolítással, a feszültség egyensúly megbontásán alapuló módszert kidolgozva és alkalmazva bizonyították, hogy még ilyen vékony huzalban is jelentős maradó feszültség található [23]. Átfogó összehasonlító vizsgálatot végeztek hidegen húzott

acél drótok esetében, ahol a FEM, szinkrotron és neutrondiffrakció maradó feszültségre vonatkozó eredmények közötti jelentős különbség okát tárgyalták [24]. Nem csak vizsgálták diffrakciós technikával ($\sin^2\psi$) és FEM segítségével, hanem a húzószerszám geometriájának módosításával nyomófeszültséget hoztak létre a drótok felszínén [25], [26]. Azonban dolgozatomban a vezetéksodronyok esetében egy képlékenyalakítással sodrott, az elemi szálak között statikusan és dinamikusan súrlódó kölcsönhatással bíró szerkezetet vizsgálunk. Ennek a szerkezetnek kell összeségében inert módon viselkednie, mind a telepítése és mind az üzemelése során. Az ilyen szerkezeteket az irodalomban elsősorban FEM segítségével vizsgálják [27], [28], [29], [30], [31].

4.1 Ikermodellre épülő vizsgálati eljárás

A következő elképzelés alapötletét az adta, hogy ha a tömeggyártásból származó vezetékeket mechanikai kényszer alatt le tudjuk venni a dobról, akkor a kényszerek alatt álló vezeték darab mindaddig őrizheti az eredeti sodrott szerkezet feszültség állapotát, amíg a kényszer alól fel nem szabadítjuk. Ekkor a sodrat szerkezetét jellemző feszültség minősíthetővé válik az által, hogy a szerkezet egyik végét felszabadítjuk, és kvantitatívan leírjuk a teljes szerkezet elmozdulását a kiinduló, kényszerezett állapothoz képest. Az elmozdulás meghatározásához a 3DLaborban rendelkezésre álló YXLON FF35 metrológia képességgel is rendelkező duál csöves CT berendezést használtuk. A mérések elvégzésében Bubonyi Tamás volt a segítségemre. A CT vizsgálatok eredményeként a sodratok tetszőleges módon virtuális metszetekre oszthatók, így azokon képelemzés segítségével le tudjuk írni a teljes szerkezet elmozdulását a megfelelő referencia pont megválasztását követően. Véges elemes szimuláció segítségével pedig az elmozdulás vektorokból rekonstruálható az azt létrehozó redukált feszültség. A kidolgozott teljes vizsgálati eljárást/és módszert a következő lépésekből áll: 1. Mintavételezés kényszerezett sodraton, 2. CT felvétel készítése kényszerezett és felszabadított sodraton, 3. Képelemzés Z és X-Y irányú metszeteken, 4. Kvantitatív elmozdulásmező, fajlagos értékek meghatározása, 5. Feszültség meghatározása digitális ikermodell segítségével.



14. ábra Sodrat a CT kamrában

Az eddigi tapasztalatok alapján a következő módszert javasoljuk a mintavételre: a dobon lévő vezetékre először két bilincset helyezünk 34 cm távolságra egymástól, majd a dob felé eső bilincstől 7 cm távolságra még egy bilincset helyezünk a dob felé. Ezután egy abrazív vágótárcsával kivágjuk a két külső bilincset mellett a 45 cm hosszú sodrat darabot úgy, hogy a dob felé eső végen 3 cm-re történjen a vágás a bilincstől, míg a távolabb eső felén 1 cm-re. Az abrazív tárcsás vágás előnye az ollóval történő vágáshoz képest, hogy a szálakra jelentősen kisebb erő hat, így csökkentve annak a lehetőségét, hogy azok elmozduljanak. A végeredményt mutatja a 14. ábra

A sodrat végei közül a két bilincsel rendelkezőt és 3 cm-rel túllógót fogjuk be a CT tárgyasztalába. Mivel összehasonlító vizsgálatot végzünk a sodratok kényszer alá helyezett kezdeti, majd felszabadított állapotai között, ezért rendkívül fontos, hogy a befogásnál ne történhessen elmozdulás. Mivel a befogott sodrat teljes hosszát kívánjuk szkennelni ezért a következőket kell figyelembe venni: olyan nagyítást kell alkalmaznunk, amivel a sodrat a teljes hossza mentén a

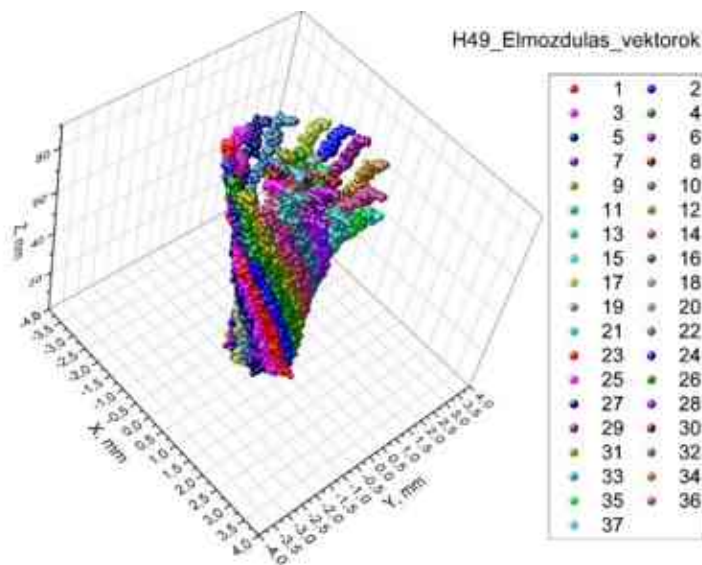
CT látómezőjében marad horizontális irányban a helikális vagy dupla helikális szkennelés során. Ugyanakkor kellően részletes felbontásra is szükségünk van, melyet 100 μm voxel méretben maximalizáltunk, azaz csak az ettől kisebb voxel mérettel rendelkező felvételt tekintjük elfogadhatónak a képelemzésre. A szkennelési üzemmódok közül előnyben részesített a helikális üzemmód, de a kevésbé előnyös dupla helikális üzemmód is megoldás lehet. A szkennelés

végeztével a mérés adott voxel méretének megfelelő metszettávolsággal, a Z tengelyre (a sodrat hossz tengelyével párhuzamos ideális esetben) merőleges metszeteket veszünk ki a referencia bilincstől a sodrat végig.



15. ábra Képelemzés folyamatábrája

tudjuk. A képelemzés lépéseinek folyamatábráját a 15. ábra szemlélteti. A képelemzés eredményeként megkapjuk az elmozdulás mezőt.



16. ábra H49 jelű sodrat elmozdulás mezője- a 37 db száli közepének elmozdulása x, y irányokba

állítunk elő. Ebből az elmozdulás mezőből megállapítjuk, hogy milyen mértékű tangenciális és radiális elmozdulást produkálnak az egyes szálak a vezeték egyik végének felszabadítása során. A belső (A) és külső (B) rétegben kiszámítjuk a szálak elmozdulásának átlagát. Ezt követően a vezeték ikermodelljét elkezdjük visszacsavarni ezekre az elmozdulási értékekre. Ekkor az ideális modellben a pusztán a geometriai okokból kialakult feszültségek leépülnek. Azonban az esetek többségében a feszültségek minimumához tartozó ponton túl kell csavarni a modellt, ahhoz, hogy a valós vezetéseken tapasztalt elmozdulást kapjuk az idealizált vezetékünkön is. Ekkor a redukált feszültségek ismét nőnek a modellben. Ez az ideálistól eltérő feszültség többlet, arányos lesz a valós

A képelemzésre szolgáló programot C++ nyelven fejlesztettük az OpenCV könyvtár eszközeinek használatával. Miután a komputertomográfiai vizsgálat eredményeként megkapjuk a sodrat virtuális metszeteit egy három feladatból álló problémát kell megoldanunk ahhoz, hogy a kényszerített sodrat szerkezet felszabadítását követő elmozdulást kvantitatívan jellemezzük.

Az x-y elmozdulás mezőt a 16. ábra mutatja a H49 jelű sodratra. Ezen elmozdulás mező a bemenő paraméter a végelesemes modellbe.

Az ikermodellünk leegyszerűsítve a következőképp működik: előállítjuk a vizsgált sodrat ideális, digitális mását, ami mentes minden olyan technológiai feszültségtől, ami nem a sodrás periódusára vezethető vissza. Ezzel első lépésben megkapjuk a kényszer alatt lévő vezeték ideális gyártástechnológiával előállított feszültség állapotát. Ebbe az idealizált modellbe a vezeték valóságos viselkedését az elmozdulás mezőn keresztül visszük be, amit a CT felvételekből képelemzés segítségével

huzalokban lévő maradó feszültséggel. Ez az az érték, amit a technológiai lépésekkel nem tervezett módon vittünk a vezetékekbe. Ez a maradó feszültség hatással lesz arra, hogy a vezeték rétegei a terhelés hatására elkezdjenek-e forogni, illetve, hogy az ide vonatkozó szabványban megfogalmazott „innertness” feltételnek mennyire fog a vezeték eleget tenni, és semleges módon viselkedni szerelés közben.

1. táblázat A CT-vel meghatározott elmozdulás mezőből származtatott, visszacsavarás százalékosan kifejezve

	Túlcsvavarás mértéke	
	A (belső réteg)	B (külső réteg)
Referencia sodrat		
átlagos elmozduláshoz képest	15 %	24 %
legközelebb eső két huzal	17 %	25 %
Rövid sodrat		
átlagos elmozduláshoz képest	11 %	12 %
legközelebb eső két huzal	10 %	11 %

rövidebb sodrathosszú minta. Mind a referencia, mind az attól eltérő mintánál két esetet ragadtunk ki. Az egyes huzalokra átlagolt redukált feszültség értékeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat Az átlagos redukált feszültség értékek a referencia és a rövid sodratra

Átlagos redukált feszültség, MPa					
felszabadítás előtt		felszabadítás után		felszabadítás után	
A (belső réteg)	B (külső réteg)	A (belső réteg)	B (külső réteg)	A (belső réteg)	B (külső réteg)
referencia sodrat					
274	275	116	154	106	138
rövid sodrat					
254	271	65	85	75	81

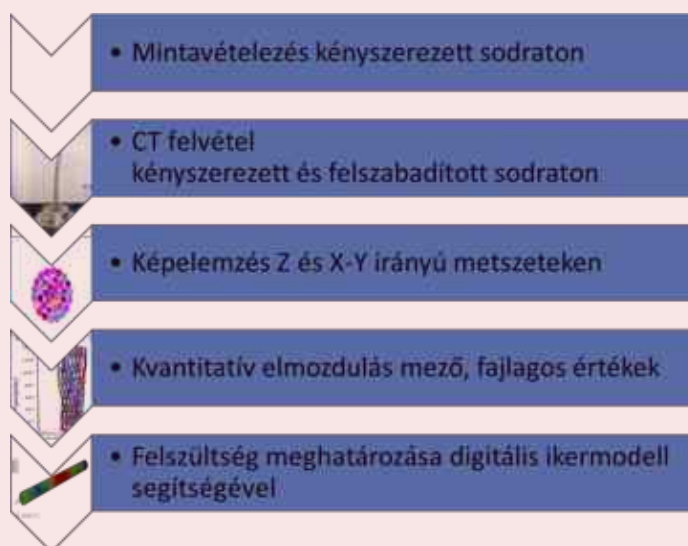
(elmozdulás és redukált feszültség) küszöbérték, aminél a termék nem kiszállítható, vagy ami utólagos kezeléssel (például hőkezeléssel) javítható, és melyik az az állapot amikor a termék probléma mentesen szerelhető kell legyen.

A 1. táblázat tartalmazza a CT-vel meghatározott, relaxált állapotra való visszacsavarás mértékét százalékosan kifejezve, a teljes vezetéket jellemző sodrat periódusra való csavarásra vonatkoztatva. A táblázat alapján a szabványos sodratperiódusú minta nagyobb mértékű visszacsavarást igényelt minta az attól eltérő,

Ezzel megtaláltuk azt a jellemző paramétert, ami eltér a kétféle állapotú vezeték esetében és ami a szerelési problémát előre jelezheti. A következő lépésként nagyszámú sodraton végzett vizsgálati eredményekre alapozva a gyártó el tudja dönteni, hogy melyik az a paraméter

4.2 Negyedik Tézis

Komputer tomográfias vizsgálat és végeselemes szimuláción alapuló ikermodellre épülő vizsgálati eljárás alkalmas vezeték sodratok gyártás közben kialakuló feszültségállapotának a jellemzésére és ebből adódóan a szerelés közbeni viselkedésének az előrejelzésére. Az eljárás a következő lépésekből épül fel:



5 Angol nyelvű összefoglaló

For the last eight years, I have carried out multiple residual stress measurements on industrial components using centerless X-ray diffractometers at the Institute of Physical Metallurgy Metal-forming and Nanotechnology and the 3D Lab. One notable feature of these measurements is that, despite being standardised, most of the measurements differ. The test is sensitive to metallurgical effects. The main principle of my research was to view metallurgical effects as valuable information and a chance for advancement rather than as a problem. I aimed to create test procedures that would mainly take advantage of these diffractometers' non-destructive or quasi-destructive nature. The research yielded four claims and, consequently, four test procedures.

The first one is designed for a centerless diffractometer operated by a robotic arm and is the first to offer a non-destructive, comprehensive texture characterization, specifically the determination of the Orientation Distribution Function (ODF). The method has been validated for rolled aluminium and employed for cross-rolled niobium.

The second method is utilised for the quasi-non-destructive evaluation of different surface metallurgical effects and surface treatments. The main idea behind the technique is that, during a quasi-non-destructive residual stress depth measurement where the specimen is only damaged over a few mm² of surface area, we can determine whether martensite is present after the carburization or decarburization process by looking at how well the interference function fits. This also allows us to define the thickness of the decarburized or carburized layers. The compound layer and diffusion zone can be distinguished during carbonitriding by analysing the full width at half-maximum data. Following a classical destructive test, the effective case depth can be determined in a quasi-destructive manner similar to the standard procedure for the same component type and treatment.

For the third approach, I identified various metallurgical impacts by analysing the fitting parameters of a single peak (interference function). By analysing the variation of the a_3 parameter of the Pseudo-Voigt function, I successfully detected processes like the formation of mechanically or thermally induced residual stresses or stress relaxation induced by thermal or mechanical processes.

The fourth test method was developed with the support of the Cooperative Doctoral Programme to address the installation issue of overhead cables. The residual stress monitoring method was unsuccessful, while the twin model-based method was conclusive. The stress state in the cable can be quantitatively determined by analysing the displacement field obtained from computed tomography images of the constrained and released sample, along with the reduced stress volume calculated from a finite element mechanical model. FUX Zrt states that the developed qualification procedure is also appropriate for laboratory tests.

All four procedures have been created and confirmed to a level of complexity that can be learned and utilised by individuals with limited experience and the required infrastructure.

6 Irodalmi hivatkozás

- [1] G. Artioli, „Crystallographic texture analysis of archaeological metals: interpretation of manufacturing techniques”, *Appl. Phys. A*, köt. 89, sz. 4, Art. sz. 4, okt. 2007, doi: 10.1007/s00339-007-4215-2.
- [2] J. A. Evans és mtsai., „Determining elastic anisotropy of textured polycrystals using resonant ultrasound spectroscopy”, *J Mater Sci*, köt. 56, sz. 16, o. 10053–10073, jún. 2021, doi: 10.1007/s10853-021-05827-z.
- [3] J. Rossin és mtsai., „Bayesian inference of elastic constants and texture coefficients in additively manufactured cobalt-nickel superalloys using resonant ultrasound spectroscopy”, *Acta Materialia*, köt. 220, o. 117287, nov. 2021, doi: 10.1016/j.actamat.2021.117287.
- [4] M. Dr. Benke, „A kristálytani anizotrópia (textúra) újszerű megközelítése”, Habilitációs értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2020.
- [5] M. Sepsi, „Teljes pólusábra meghatározására alkalmas mérési módszer kidolgozása központ nélküli röntgendiffraktométerekre”, Miskolc, 2016.
- [6] M. Dr. Benke, M. Sepsi, V. Dr. Mertinger, és V. Kárpáti, „Szabadalom: Pólusábrák és azok metszeteinek mintakivágást nem igénylő mérési módszere központ nélküli röntgendiffraktométerrel omega és módosított pszi módban”, Lajstromszám: 231481
- [7] U. F. Kocks, C. N. Tomé, és H.-R. Wenk, *Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties*. Cambridge: Cambridge university press, 1998.
- [8] A. Hasani, M. Sepsi, S. Feyzi, és L. S. Toth, „Deformation field and texture analysis in T-ECAP using a flow function”, *Materials Characterization*, köt. 173, o. 110912, márc. 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2021.110912.
- [9] M. Sepsi, M. Benke, és V. Mertinger, „Non-destructive texture characterization by a robot-arm-driven X-ray diffractometer”, *J Appl Crystallogr*, köt. 57, sz. 1, o. 94–103, febr. 2024, doi: 10.1107/S1600576723010993.
- [10] P. Szobota, „Dekarbonizáció mérése roncsolámentes módszerrel- avagy a központ nélküli diffraktométerek új alkalmazása”, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2020.
- [11] M. Sepsi, P. Szobota, és V. Mertinger, „Quasi-Non-destructive Characterization of Carburized Case Depth by an Application of Centerless X-ray Diffractometers”, *J. of Materi Eng and Perform*, köt. 31, sz. 6, o. 4668–4678, jún. 2022, doi: 10.1007/s11665-022-06591-0.
- [12] P. Fu, R. Chu, Z. Xu, G. Ding, és C. Jiang, „Relation of hardness with FWHM and residual stress of GCr15 steel after shot peening”, *Applied Surface Science*, köt. 431, o. 165–169, febr. 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.09.136.
- [13] J. Li és mtsai., „A numerical model to predict residual stresses induced by ultrasonic shot peening treatment of Inconel 600”, előadás CONTACT AND SURFACE 2011, Malta, szept. 2011, o. 75–84. doi: 10.2495/SECM110071.
- [14] P. Szobota, „Karbonitridált réteg minősítése központ nélküli röntgendiffraktométerekkel”, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2022.
- [15] B. E. Warren és B. L. Averbach, „The Effect of Cold-Work Distortion on X-Ray Patterns”, *Journal of Applied Physics*, köt. 21, sz. 6, o. 595–599, jún. 1950, doi: 10.1063/1.1699713.
- [16] B. E. Warren és B. L. Averbach, „The Separation of Cold-Work Distortion and Particle Size Broadening in X-Ray Patterns”, *Journal of Applied Physics*, köt. 23, sz. 4, o. 497–497, ápr. 1952, doi: 10.1063/1.1702234.
- [17] H. P. Klug és L. E. Alexander, *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*, 2d ed. New York: Wiley, 1974.
- [18] Th. H. Keijsers, J. I. Langford, E. J. Mittemeijer, és A. B. P. Vogels, „Use of the Voigt function in a single-line method for the analysis of X-ray diffraction line broadening”, *J Appl Crystallogr*, köt. 15, sz. 3, o. 308–314, jún. 1982, doi: 10.1107/S0021889882012035.
- [19] G. K. Wertheim, M. A. Butler, K. W. West, és D. N. E. Buchanan, „Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes”, *Review of Scientific Instruments*, köt. 45, sz. 11, o. 1369–1371, nov. 1974, doi: 10.1063/1.1686503.
- [20] R. A. Young és D. B. Wiles, „Profile shape functions in Rietveld refinements”, *J Appl Crystallogr*, köt. 15, sz. 4, o. 430–438, aug. 1982, doi: 10.1107/S002188988201231X.

- [21] D. Cseh, „Maradó feszültség relaxációja fásasztó igénybevétel közben”, 2019, doi: 10.14750/ME.2019.006.
- [22] EN 50182:2000, „Conductors for overhead lines - Round wire concentric lay stranded conductors”.
- [23] J. Vaïssette, M. Paredes, és C. Mabru, „A residual stress characterization method of a small diameter wire by matter removal”, 2022.
- [24] A. Phelippeau és mtsai., „Cold drawn steel wires—processing, residual stresses and ductility Part II: Synchrotron and neutron diffraction”, *Fatigue Fract Eng Mat Struct*, köt. 29, sz. 3, o. 255–265, márc. 2006, doi: 10.1111/j.1460-2695.2005.00987.x.
- [25] M. Baumann, R. Selbmann, M. Milbrandt, V. Kräusel, és M. Bergmann, „Adjusting the Residual Stress State in Wire Drawing Products via In-Process Modification of Tool Geometries”, *Materials*, köt. 14, sz. 9, o. 2157, ápr. 2021, doi: 10.3390/ma14092157.
- [26] R. Selbmann, M. Baumann, M. Dobecki, M. Bergmann, V. Kräusel, és W. Reimers, „Concept for controlled adjustment of residual stress states in semi-finished products by gradation extrusion”, *Arch Appl Mech*, köt. 91, sz. 8, o. 3627–3636, aug. 2021, doi: 10.1007/s00419-021-01937-x.
- [27] A. G. Korchunov, E. M. Medvedeva, P. V. Ivekeeva, és D. V. Konstantinov, „FEM study of internal stresses evolution in prestressing strands”, *cisisr*, o. 21–24, dec. 2020, doi: 10.17580/cisisr.2020.02.05.
- [28] I. Páczelt és R. Belezna, „Nonlinear contact-theory for analysis of wire rope strand using high-order approximation in the FEM”, *Computers & Structures*, köt. 89, sz. 11–12, o. 1004–1025, jún. 2011, doi: 10.1016/j.compstruc.2011.01.011.
- [29] W. G. Jiang, M. S. Yao, és J. M. Walton, „A concise finite element model for simple straight wire rope strand”, *International Journal of Mechanical Sciences*, köt. 41, sz. 2, o. 143–161, febr. 1999, doi: 10.1016/S0020-7403(98)00039-3.
- [30] L. Wang, N. Limodin, A. El Bartali, J.-F. Witz, J.-Y. Buffiere, és E. Charkaluk, „Application of Synchrotron Radiation–Computed Tomography In-Situ Observations and Digital Volume Correlation to Study Low-Cycle Fatigue Damage Micromechanisms in Lost Foam Casting A319 Alloy”, *Metall Mater Trans A*, köt. 51, sz. 8, o. 3843–3857, aug. 2020, doi: 10.1007/s11661-020-05839-5.
- [31] A. Kurt, „ANALYSIS WITH FINITE ELEMENT METHOD OF WIRE ROPE”, 2012. [Online]. Elérhető: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:22640371>

7 Saját publikációk (2019-2024) és független hivatkozások

A doktori cselekményhez kapcsolódó szabadalom:

[Sz1] M. Dr. Benke, M. Sepsi, V. Dr. Mertinger, and V. Kárpáti, ‘Pólusábrák és azok metszeteinek mintakivágást nem igénylő mérési módszere központ nélküli röntgendiffraktométerrel omega és módosított pszi módban’, *lajstromszám: 231481*

A doktori cselekményhez kapcsolódó publikációk és független hivatkozások:

- [D1] M. Sepsi, V. Mertinger, and M. Benke, ‘Sample cutting-free pole figure measuring method for centreless diffractometers in modified X mode’, *Materials Characterization*, vol. 151, pp. 351–357, May 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.03.031. **D1**
- [D2] M. Sepsi, M. Benke, and V. Mertinger, ‘Non-destructive texture characterisation by a robot-arm-driven X-ray diffractometer’, *J Appl Crystallogr*, vol. 57, no. 1, pp. 94–103, Feb. 2024, doi: 10.1107/S1600576723010993. **Q1**
- [D3] M. Sepsi, P. Szobota, and V. Mertinger, ‘Quasi-Non-destructive Characterization of Carburized Case Depth by an Application of Centerless X-ray Diffractometers’, *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 31, no. 6, pp. 4668–4678, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11665-022-06591-0. **Q2**

- hiv:1. Öztürk SEMİH et al. Calculation of Residual Stress in Ships by the Method of the Fresnel Approximation. (2022) Acta Natura et Scientia 2718-0638 3 1 59-69
2. Ptačinová J. et al. Characterisation of dual phase boride coatings on Sverker 3 steel and simulation of boron diffusion. (2023) MATERIALS TESTING 0025-5300 0025-5300 65 4 578-592
3. Tong Kai et al. Investigation of SMFL monitoring technique for evaluating the load-bearing capacity of RC bridges. (2023) ENGINEERING STRUCTURES 0141-0296 1873-7323 293 p. 116667
- [D4] M. Sepsi, V. Mertinger, and M. Benke, 'Novel applications of centreless X-ray diffractometers for non-destructive pole figure measurements', J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1270, no. 1, p. 012011, Aug. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1270/1/012011.
- [D5] M. Sepsi, M. Benke, and M. Valéria, 'Archaeological application of centreless X-ray diffractometers for non-destructive pole figure measurements', konferencia kiadvány, Firenze, Olaszország, 2019.
- [D6] M. Sepsi, M. Benke, and V. Mertinger, 'Non-destructive pole-figure measurements on workshop-made silver reference model of archaic objects', ACTA IMEKO, vol. 10, no. 1, p. 250, Mar. 2021, doi: 10.21014/acta_imeko.v10i1.896.
- [D7] M. Sepsi, M. Benke, and V. Mertinger, 'New, non-invasive texture measurement method for archaeology', konferencia kiadvány, Firenze, Olaszország, 2019.
- [D8] V. Mertinger et al., 'Deformability Tests of Pure Niobium', IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 903, no. 1, p. 012019, Aug. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/903/1/012019.
- [D9] P. Szobota, M. Sepsi, and V. Mertinger, 'Non-destructive Test for Control of the Surface Quality of Semi Product at the Automotive Industry', in Vehicle and Automotive Engineering 3, K. Jármái and K. Voith, Eds., in Lecture Notes in Mechanical Engineering, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 112–122. doi: 10.1007/978-981-15-9529-5_10.
- Hiv:Chávez-Campos G.M. et al. Improving Selectivity on High-Temperature Decarburization Depth Measurements using and Image Segmentation Method. (2022) OXIDATION OF METALS 0030-770X 1573-4889 98 1-2 121-134
- [D10] A. Baksa, L. P. Kiss, M. Sepsi, P. Barkóczy, and V. Mertinger, 'Alumínium távvezetékben ébredő maradó feszültségek szimulációja', konferencia kiadvány, Miskolc, 2022. [Online]. Available: ISBN 978-963-358-277-0
- [D11] Szobota Péter - Sepsi Máté - Mertinger Valéria: Dekarbonizáció mérése roncsolás mentes módszerrel – avagy a központ nélküli diffraktométerek új alkalmazása. - In: Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, ISSN 0005-5670, 2020. (153. évf.), 4. sz., 59-63. p.
- [D12] M. Sepsi, A. Jawabreh, G. Nemcsik, and P. Barkóczy, "The Effect of Surface Treatment on the Audible Noise of a High Voltage Conductor", *Hungarian Materials and Chemical Sciences and Engineering*, vol. 47, no. 1, pp. 63–71, Nov. 2023.
- [D13] A. Jawabreh, M. Sepsi, and P. Barkóczy, "Elasticity and Heat Resistivity of Heat-Treated High Voltage Conductors", *Hungarian Materials and Chemical Sciences and Engineering*, vol. 47, no. 1, pp. 53–62, Nov. 2023.
- [D14] M. Benke, A. Hlavacs, F. Kristaly, M. Sepsi, and V. Mertinger, 'Estimation of Phase Ratio in Bulk, Textured TWIP/TRIP Steels from Pole Figures', Materials, vol. 14, no. 15, p. 4132, Jul. 2021, doi: 10.3390/ma14154132. **Q2**
- Hiv:Trejo-Hernández Raúl et al. Crystalline phase purity and twinning of Mg-doped zinblende GaN thin films. (2023) APPLIED SURFACE SCIENCE 0169-4332 1873-5584 636
- [D15] A. Gallifa Terricabras and others, 'Assessment of the Mechanical Properties of Ultra-High Purity Niobium After Cold Work and Heat Treatment With the HL-LHC Crab Cavities as Benchmark', in 19th International Conference on RF **Superconductivity (SRF 2019)**, 2019, pp. 862–867. doi: 10.18429/JACoW-SRF2019-THP012.
- hiv:1. Formisano Antonio et al. Considerations on the Influence of the Tool/Sheet Contact Conditions for Incremental Forming of Niobium Sheets. (2021) Megjelent: ESAFORM 2021 pp. 1-11
2. Griensmann Tjorben et al. Laser-based powder bed fusion of niobium with different build-up rates. (2021) INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY 3-3015 114 1 305-317
3. Formisano A. et al. Formability and surface quality of nonconventional material sheets for the manufacture of highly customised components. (2022) INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIAL FORMING 1960-6206 1960-6214 15 2

4. Yamanaka Masashi et al. Relation Between Tensile Strength and Annealing Temperature for High Purity Niobium. (2023) IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 1051-8223 1558-2515 33 4 1-5

[D16] R. P. S. Sisodia, M. Gáspár, M. Sepsi, and V. Mertinger, 'Dataset on full width at half maximum of residual stress measurement of electron beam welded high strength structural steels (S960QL and S960M) by X-ray diffraction method', *Data in Brief*, vol. 38, p. 107341, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.dib.2021.107341.

hiv:1. Andoko Andoko et al. Coil Spring Failure Analysis Reviewed from Residual Stress, Crystal Orientation, and Texture. (2023) *Automotive Experiences* 2615-6636 2615-6202 6 3 515-527

<https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=10054570>

4 / 9 2024. 03. 03. 13:53

2. Malik Rajat et al. Recent Methodologies of Measuring Residual Stresses in Welded Joints: A Review. (2023)

Megjelent: Emerging Trends in Mechanical and Industrial Engineering pp. 521-531

3. Miao Huilin et al. Multiple analyses of factors influencing fatigue

life of linear friction welded low carbon steel. (2024) *Journal of*

Advanced Joining Processes 2666-3309 9 p. 100201

[D17] R. P. S. Sisodia, M. Gáspár, M. Sepsi, and V. Mertinger, 'Comparative evaluation of residual stresses in vacuum electron beam welded high strength steel S960QL and S960M butt joints', *Vacuum*, vol. 184, p. 109931, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109931. Q1

hiv:1. Musole Kambita. A comparative evaluation of hydrostatic pressure and buckling of a large cylindrical steel tank designed according to EN14015 and according to the Eurocodes. (2021)

2. Lukács János. A „Korszerű anyagok és intelligens technológiák” FIEK keretében végzett kutatások és legfontosabb eredményeik, 2016–2021. (2021) ISBN:9789633582589

3. Zhang Mingyang et al. Characterisation of Si–Cu–C–Al quaternary interface of SiC/2A14 joint via counterintuitive laser butt welding. (2021) *VACUUM* 0042-207X 1879-2715 189

4. Feng Guangjie et al. Comparison of welding residual stress and deformation induced by local vacuum electron beam welding and metal active gas arc welding in a stainless steel thick-plate joint. (2021) *JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY*

2238-7854 2214-0697 13 1967-1979

5. * Sisodia Raghawendra et al. Dataset on Full Width at Half Maximum of residual stress measurement of electron beam welded high strength structural steels (S960QL and S960M) by Xray diffraction method. (2021) *DATA IN BRIEF* 2352-3409 38

6. Tümer Mustafa et al. Residual Stresses, Microstructure, and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Thick S1100 Steel. (2021) *JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE* 1059-9495 1544-1024

7. Tümer M. et al. Fusion welding of ultra-high strength structural steels – A review. (2022) *JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES* 1526-6125 2212-4616 82 203-229

<https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=10054570>

5 / 9 2024. 03. 03. 13:53

8. Mustafa Tümer et al. Mechanical and microstructural properties of S1100 UHSS welds obtained by EBW and MAG welding. (2022) *WELDING IN THE WORLD* 0043-2288 1878-6669 2022 1-13

9. Májlinger Kornél et al. Prediction of the Shear Tension Strength of Resistance Spot Welded Thin Steel Sheets from High- to Ultrahigh Strength Range. (2022) *PERIODICA POLYTECHNICA-MECHANICAL ENGINEERING* 0324-6051 1587-379X 66 1 67-82

10. Wu Ruolin et al. Stress and distortion of the 10 mm thick plate EH40 and 316L different butt joints in 10 kW laser welding. (2022) *OPTICS AND LASER TECHNOLOGY* 0030-3992 1879-2545 152

11. Khaleel Hayder H. et al. Fatigue and impact properties of single and double resistance spot welding for high-strength steel used in automotive applications. (2023) *JOURNAL OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES AND ENGINEERING*

1678-5878 1806-3691 45 3

12. Májlinger Kornél et al. Global Approach on the Shear and Cross Tension Strength of Resistance Spot Welded Thin Steel Sheets. (2023) *PERIODICA POLYTECHNICA-MECHANICAL ENGINEERING* 0324-6051 1587-379X 67 4 315-339

13. Xiong Xiaoli et al. Longitudinal residual stress distribution of Q460 high-strength steel welded T-section. (2023) *Hanjie Xuebao / Transactions of the China Welding Institution* 0253-360X 44 8 63-73

14. Keränen Lassi et al. Residual stresses of MAG-welded ultrahighstrength steel rectangular hollow sections. (2024) *ENGINEERING STRUCTURES* 0141-0296 1873-7323 305 p. 117719

15. Tümer Mustafa et al. Welding of S1100 Ultra high-Strength Steel Plates with Matching Metal-Cored Filler Wire: Microstructure, Residual Stresses, and Mechanical Properties. (2024) *STEELRESEARCH INTERNATIONAL* 1611-3683 1869-344X -- p. 2300675

A doktori cselekményhez kapcsolódó előadások:

[D18] M. Sepsi, 'New, non-invasive texture measurement method for archaeology', presented at the International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Firenze, Olaszország, 2019.

[D19] M. Sepsi, 'Nióbbium roncsolásmentes textúra vizsgálata szupravezető alkalmazásokhoz', presented at the Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese, 2019.

[D20] M. Sepsi, V. Mertinger, and M. Benke, 'Novel applications of centreless X-ray diffractometers for non-destructive pole figure measurements', presented at the ReX&GG, Ghent, Belgium, Aug. 01, 2019. Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1270/1/012011>

[D21] M. Sepsi, M. Benke, A. G. Terricabras, A. Hlavács, and V. Mertinger, 'Non-destructive pole figure and ODF measurement method by CHI mode - An innovative application of a robot armed centreless Xray diffractometer'. ICOTOM Conference, 2021, Osaka

[D22] M. Sepsi, 'Residual stress monitoring as a quality assurance process supporting manufacturing and development', presented at the International Conference on Residual Stresses, Nancy, Franciaország, 2022.

Doktori cselekményhez nem kapcsolódó publikációk:

[ND1] A. Hasani, M. Sepsi, S. Feyzi, and L. S. Toth, 'Deformation field and texture analysis in T-ECAP using a flow function', *Materials Characterization*, vol. 173, p. 110912, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2021.110912.

hiv: 1. El-Shenawy M. et al. Effect of ECAP on the Plastic Strain Homogeneity, Microstructural Evolution,

Crystallographic Texture and Mechanical Properties of AA2xxx Aluminum Alloy. (2021) *METALS* 2075-4701 11 6

2. Snopiński Przemysław. Influence of the ECAP Tool Channel Geometry on the Structure and Properties of Al-3%Mg Aluminium Alloy. (2021) *SOLID STATE PHENOMENA* 1012-0394 1662-9779 326 125-147

3. Yang Z. et al. ECAP based regulation mechanism of shape memory properties of NiTiNb alloys. (2022) *JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS* 0925-8388 1873-4669 897

4. Xue Kemin et al. Effect of deformation behavior on the evolution of microstructure of RAFM steel subject to closed-dual equal channel angular pressing. (2022) *FUSION ENGINEERING AND DESIGN* 0920-3796 1873-7196 184 Keresés: (MTMT)

<https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=10054570> 3 / 9 2024. 03. 03. 13:53

5. Zhu N. et al. Novel process combined extrusion and severe plastic deformation for plate component with rib-web structure of magnesium alloys. (2022) *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY* 0268-3768 1433-3015

6. Li Songqing et al. Multiple shearing induced in one-step deformation fabricating gradient-structured aluminium disks. (2023) *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY* 0924-0136 1873-4774 322

7. Pariyar Abhishek et al. Room-Temperature Single-Step Production of Ultrafine-Grained Bulk Metallic Sheets From Al Powder. (2023) *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING TRANSACTIONS OF THE ASME* 1087-1357 1528-8935 145 10

8. Jebelli A. Ahmadi et al. Superior combined strength and elongation by conducting elevated temperature constrained groove pressing on Al-Mg-Mn sheets. (2023) *MATERIALS CHEMISTRY AND PHYSICS* 0254-0584 1879-3312 307

[ND2] L. S. Tóth, M. Sepsi, M. Szűcs, S. N. Kumaran, and T. C. Lowe, 'The mechanics of the friction-assisted lateral extrusion process', *J Mater Sci*, Jan. 2024, doi: 10.1007/s10853-023-09245-1.

8 Köszönetnyilvánítás

A szerteágazó kutatómunkámat nagyon sokan segítették. Először témavezetőmnek, Dr. Mertinger Valériának szeretnék köszönetet mondani, aki tudományos diákköri tevékenységem kezdete óta támogatja a kutatói pályámat. Köszönöm, hogy lehetőségem volt számos külföldi konferencián részt vennem, ahol olyan szakmai közösségekkel ismerkedhettem meg, amelyek lehetőséget adtak a PhD kutatáson túli, új kihívásoknak is.

Dr. Barkóczy Péternek és a FUX Zrt.-nek köszönöm, a kooperatív ösztöndíj nyújtotta lehetőséget.

A Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet teljes kollektívájának hálás vagyok, hogy a kutatáshoz biztosította azt a kivételes infrastrukturális és kollegiális háttérrel, mely már nagyon korán vonzóvá tette számomra a kutatói pályát. Kiemelném Dr. Benke Mártont a szabadalom összeállításában való közreműködéséért.

Az első tézis kapcsán szeretném még kiemelni Dr. Tóth Mária (Totyi)[†] szerepét, aki a Seuso kincsek vizsgálata közbeni hosszú beszélgetések között vetette fel a roncsolásmentes textúra vizsgálat lehetőségét, és akinek ötletére alapoztuk a szabadalmat és az egész eljárás kidolgozását. Köszönet a CERN-ből Dr. Adria Gallifa Terricabrasnak a nióbbium alakíthatósági projektért, mely projekt igazolta az eljárás létjogosultságát. A metzi kollégáknak, elsősorban Dr. Tóth S. Lászlónak és Dr. Olivier Perroudnek a hagyományos textúra mérésekben, és Dr. Jan-Jacques Fundenbergernek és Dr. Benoit Beausirnak az ATEX szoftver alkalmazásához nyújtott segítségét köszönöm.

A második, harmadik tézisek megszületése azon hallgatók közreműködésével valósult meg akiknek konzulense voltam, és akik lelkiismeretesen elvégezték a rájuk bízott feladatokat (Szobota Péter, Cser Rita, Hussein M Abduljaleel), lelkesedésük engem is inspirált. Az ipari partnerek közül Széll Attilának és TS Magyarország Kft.-nek, valamint a KV63 Hőkezelő Kft.-nek köszönöm a próbatestek előállításában nyújtott segítséget.

A negyedik tézishoz kapcsolódó eljárás Dr. Baksa Attila és Dr. Kiss László Péter (Műszaki Mechanikai Intézet) VEM számításai és Bubonyi Tamás CT vizsgálatai nélkül nem tudott volna elkészülni.

A disszertáció AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM KOOPERATÍV DOKTORI PROGRAM DOKTORI HALLGATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.



A támogató projektek közül szeretném még megemlíteni az Új Nemzeti Kiválósági Programot, az ERASMUS mobilitási programot és az OTKÁ-t.

Végül, de nem utolsó sorban családomnak szeretnék köszönetet mondani, akik kutatási munkám sikerében mindig támogattak.