

Hidegalakítás és hőkezelés hatása a transzformátorlemezek mechanikai, mágneses és mikroszerkezeti tulajdonságaira

Effects of cold working and heat treatment on the mechanical, magnetic and microstructural properties of transformer sheets

RAJKÓ Kata Eszter¹, SZABÓ Péter János², MÉSZÁROS István³

1: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3, +36308897114,
rajkokataeszter@edu.bme.hu

2: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3, +36209273794,
szabo.peter.janos@gpk.bme.hu

3: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3, +36203470373,
meszaros@eik.bme.hu

Abstract

Transformer sheets are magnetic silicon steel sheets, and their role is to conduct the magnetic field with the lowest possible loss for voltage transformation. In light of their importance in the energy industry, their investigation is crucial for efficient material selection and performance optimization. In this paper, we studied the effect of cold working and heat treatment on the magnetic, mechanical and microstructural properties of ferritic, silicon steel of different compositions. Both destructive and non-destructive methods were applied.

Keywords: transformer sheets, magnetic measurements, X-ray diffraction, Electron Backscatter Diffraction, Energy Dispersive Spectroscopy

Kivonat

A transzformátorlemezek feladata a mágneses tér minél kisebb veszteséggel történő vezetése a feszültség átalakításához. Az energiaiparban betöltött szerepük miatt vizsgálatuk fontos a hatékony anyagválasztás és teljesítményoptimalizálás szempontjából. Kutatómunkánk során a hidegalakítás és hőkezelés különböző elemösszetételű, ferrites szövetszerkezetű, vas-szilícium lemezek mágneses, mechanikai tulajdonságaira és mikroszerkezetére gyakorolt hatását vizsgáltuk. Roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokat is végeztünk.

Kulcsszavak: transzformátorlemez, mágneses mérések, röntgendiffrakció, visszaszórtelektron-diffrakció, energiadiszipatív röntgenspektroszkópia

1. BEVEZETÉS

A transzformátorlemezek a primer és szekunder tekercs között elhelyezkedő vasmagot alkotják. Olyan szilíciumtartalmú mágneses acéllemezek, melyeknek feladata a mágneses tér minél kisebb veszteséggel történő vezetése. A primer tekercsre kapcsolt váltakozó feszültség hatására abban váltakozó áram folyik, ami a vasmagban váltakozó mágneses teret, így váltakozó fluxust hoz létre. A változó fluxus a Faraday-féle indukciótörvény szerint a szekunder tekercsben váltakozó feszültséget indukál.

A dolgozat témája a különböző elemösszetételű, ferrites szövetszerkezetű, vas-szilícium transzformátorlemezek mágneses, mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságainak vizsgálata különböző állapotokban: alapállapotú, hidegalakított, feszültségcsökkentő hőkezelt és újrakristályosított minták esetén. Jelentőségét bizonyítja, hogy a szakirodalomban számos hasonló témájú publikáció is megjelent, azonban ezek többnyire egy adott ötvözetre vagy korlátozott számú vizsgálati módszerre koncentrálnak [1]. Ezzel szemben ez esetben öt különböző elemösszetételű mintán egységes mérési elrendezéssel és hétféle mérési módszer alkalmazásával végeztük el a méréseket, amelyek roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokat is magába foglaltak.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Próbatetek kiválasztása

Kezdetben összesen tizennégy, az iparban gyakran alkalmazott anyagokból készült próbatet állt rendelkezésre, melyek számozása véletlenszerűen történt. A vizsgálandó lemezek hossza 280 mm, szélessége 30 mm, vastagsága 0,35-0,75 mm tartományba esik, amelyek közül kiválasztásra kerültek a később vizsgálandó darabok. Ehhez két mérés elvégzése volt szükséges. Először a mágnesezési görbék mérése történt meg, majd szakítógéppel segítségével sor került a próbatetek nyújtására. Azok a minták képezik a későbbi vizsgálatok tárgyát, amelyek mágneses és mechanikai tulajdonságai teljesítik a kívánt szempontokat. A mágneses vizsgálatoknál azokat a mintákat zártuk ki, amelyek vagy más mintákhoz hasonló mágneses viselkedést mutattak, vagy amelyek hiszterézisgörbéjén anizotrópia volt megfigyelhető. A szakítóvizsgálat esetében pedig azokat hagytuk figyelmen kívül, amelyek rideg viselkedést mutattak. Összesen öt próbatet volt, mely számunkra kedvező mechanikai és mágneses tulajdonsággal rendelkeztek. Ezek az alábbi sorszámú próbatetek voltak: 1, 2, 5, 11, 13.

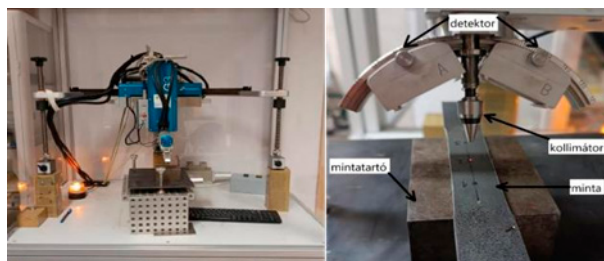
2.2. Mintaelőkészítések

A kiválasztott öt próbatet különböző deformációra nyújtott darabjait MTS 810 típusú szervó-hidraulikus szakítógéppel segítségével hoztuk létre. A próbatetek megnyúlásának mértéke mind az öt mintánál egyedileg lett meghatározva a szakítódiagramjuk alapján, figyelembe véve, hogy az alakváltozások mértéke közel egyenletesen legyen elosztva, illetve, hogy a legnagyobb mértékű megnyúlás ne haladja meg az egyes lemezek szakítószilárdságának 70 %-át. Az alapállapotúak mellett ugyanazon deformációból több mintát is készítettünk, így a későbbi hőkezelésekhez is készült megnyújtott minta.

A hőkezelési eljárásokon belül feszültségcsökkentő és újrakristályosító hőkezelést alkalmaztunk. A korábban megnyújtott próbatetek minden egyes deformációs szintjéből három darab készült, így a két hőkezelt minta mellett megmaradt egy csak hidegalakított, de nem hőkezelt minta is az alapállapotú mellett. A feszültségcsökkentő hőkezelés esetében a próbateteket 450 °C-os hőmérsékleten tartottuk 1 órán keresztül a hőkezelő kemencében. Ezt követően szabad levegőn történt meg a lehűlés több órán keresztül, aminek köszönhetően lassan, fokozatosan hűltek le a lemezek szobahőmérsékletre. Ennek célja a hidegalakítás okozta belső feszültséget csökkentése volt. A lemezek újrakristályosítása 750 °C-on történt, a hőkezelési idő 30 perc volt. Ezt követte a lehűtés, amely ebben az esetben is szabad levegőn történt több órán keresztül. Az újrakristályosító hőkezelés során nitrogéngázt alkalmaztunk, amely a hőkezelő kemencében lévő oxigéntartalom miatti oxidáció minimalizálását szolgálta.

2.3. Vizsgálati módszerek

A mérési módszereket tekintve energiadiszipatív röntgenanalízissel meghatároztuk a próbatetek kémiai összetételét. A mágneses hiszterézisgörbék és a normál mágnesezési görbék a mágneses indukció változását ábrázolják a külső mágneses tér függvényében. A mágneses Barkhausen-mérés elvégzésével a hidegalakítás és a hőkezelés hatását vizsgáltuk a mágneses doménfallozgatásra [2]. A röntgendiffrakciós vizsgálat célja az 5. próbatet maradó feszültségének meghatározása volt, amelyre a különböző folyamatok okozta rácsállandó- változásból lehetett következtetni. Egy röntgendiffraktométer-berendezést szemléltet az 1. ábra. Emellett az átlagos szemcseméretet Rosiwall-módszerrel határoztuk meg, illetve mikrokeménység-méréseket is végeztünk a próbateteken. Az 5. próbateten visszaszórtelektron-diffrakció (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) vizsgálatot is végeztünk, amellyel a szemcsén belüli pontok orientációjának átlagos különbségét (Grain Average Misorientation, GAM), a geometriailag szükséges diszlokációk számát (Geometrically Necessary Dislocations, GND) és a szemcsék méretét (Grain Size, GS) határoztuk meg. A mérés eredményeként inverz pólusábrát is eredményül kaptunk, ami az egyes szemcsék orientációs eloszlását szemlélteti.



1. ábra. Röntgendiffraktométer berendezése

3. EREDMÉNYEK

3.1. EDS-vizsgálat

Az 1. táblázatban látható a minták elemösszetétele. Ez alapján kijelenthető, hogy szinte az összes próbatest legnagyobb mennyiségben szilícium ötvözött tartalmaz, mely csökkenti a mágneses anizotrópiát és a doménfalak mozgásának ellenállását, ezáltal csökkentve a koercitív teret és a mágneses veszteséget. Emellett növeli az acél elektromos ellenállását, így a váltakozó mágneses tér által indukált örvényáramok kisebbek lesznek a vasmagban, ami kevesebb vasveszteséget és így nagyobb hatásfokot eredményez.

A próbatestek kémiai összetétele

1. táblázat

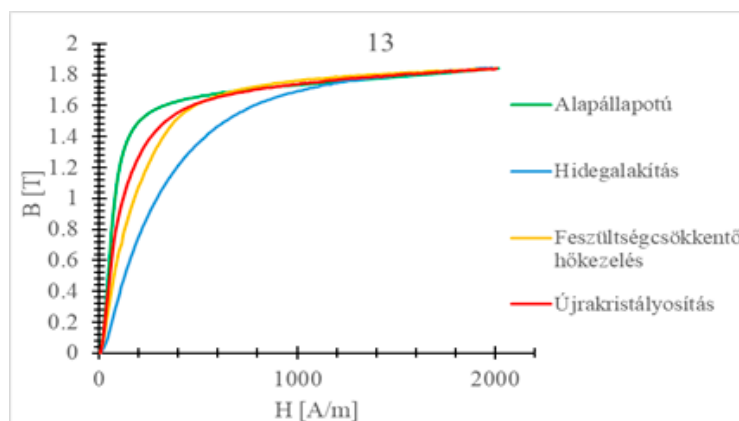
próbatest	elemek			
	Fe [m%]	Si [m%]	Al [m%]	Mn [m%]
1	97,43	1,77	0,39	0,40
2	99,41	0,05	0,19	0,35
5	95,94	3,03	0,83	0,20
11	96,39	3,17	0,27	0,15
13	96,89	2,90	0,19	-

3.2. Mágnesezési görbék és mágneses Barkhausen-mérés

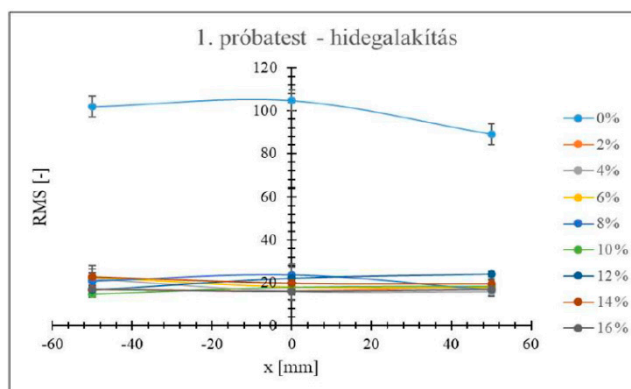
A mágneses hiszterézisgörbék és a normál mágnesezési görbék a mágneses indukció változását ábrázolják a külső mágneses tér függvényében. A 13. próbatest normál mágnesezési görbéi láthatók a 2. ábrán. A Barkhausen-mérés eredményét olyan grafikonon ábrázoltuk, melynek vízszintes skálája a próbatest hosszanti irányába felmért 100 mm-es szakasz, középen a 0 koordinátával, függőleges tengelyén pedig az RMS-értékek szerepelnek. Az 1. próbatest hidegalakítás után mért RMS-értékeit a 3. ábra grafikonja szemlélteti. Mindkét esetben próbatestenként négyféle grafikon készült, az alapállapotú, a hidegalakított, a feszültségcsökkentő hőkezelésen átesett és az újrakristályosított mintákra vonatkozóan.

A hidegalakítás következtében csökkent a lemezek mágneses permeabilitása és remanens indukciója, miközben nőtt a hiszterézisveszteség, amit a mágnesezési görbék vizsgálata igazolt. A Barkhausen-zajmérések során a várakozásoknak megfelelően már minimális mértékű hidegalakítás is jelentős RMS-érték csökkenést eredményezett, amely a deformáció mértékének növekedésével tovább csökkent [3]. A jelenség hátterében a diszlokációsűrűség növekedése áll, amely megnehezíti a mágneses doménfalak ugrásszerű mozgását [4].

A feszültségcsökkentő hőkezelés hatására a vizsgált paraméterek értékei kis mértékben csökkentek a hidegalakított állapothoz képest. Az újrakristályosítás következtében a mágnesezési görbék szinte fedésbe kerültek, és az előzetes hidegalakítás mértékétől függetlenül hasonló mágneses tulajdonságokat mutattak a próbatestek. A korábbi állapotokhoz képest nőtt a permeabilitás és a remanens indukció értéke, ugyanakkor a várakozásoktól eltérően az 5. próbatest kivételével az összes lemez mágneses vesztesége növekedett. Ez többek között a remanens indukció ugrásszerű növekedésével magyarázható. A hőkezelés hatására a hidegalakított darabok RMS-értékei növekedtek, és a szemcseméret változásától, illetve a szemcsehatárok számától függően közelítették az alapállapot értékeit. Az 5. próbatest részlegesen kristályosodott újra, ami közel változatlan szemcseméretet eredményezett, ez pedig az RMS-értékekben is megnyilvánult.



2. ábra. A 13. próbatest normál mágnesezési görbéi az anyag különböző állapotaiban



3. ábra. Hidegalakítás után mért RMS-görbék

3.3. Röntgendiffrakció

A mérési eredmények számszerű értékét a 2. táblázat tartalmazza, melyek meghatározásához a $\sin^2\psi$ eljárást alkalmaztunk. A mérőszámok közül σ a maradó feszültséget, τ a nyírófeszültséget, az FWHM (Full Width at Half Maximum) a félértékszélességet jelöli.

Az FWHM a diffrakciós profil magasság felénél, azaz a félmaximumnál a diffrakciós csúcs szélességét jellemzi fokban. Ha a kristály nanométeres szemcsékből áll vagy vannak benne kristályhibák, a tökéletes kristálysíkok eltorzulnak és emiatt a Bragg-szögön kívül más szögekben is lesz diffrakció, ami a diffrakciós csúcs kiszélesedését okozza. Az FWHM értéke nőtt alakítás hatására, ami a növekvő diszlokációk száma miatt van [5]. Az első, kisebb hőmérsékletű hőkezelés hatására ennek értéke csökkent a diszlokációk számának csökkenése miatt, majd az újrakristályosító hőkezelés további csökkenést eredményezett.

Az alapállapotú lemez felületközeli tartományában nyomófeszültség alakult ki az előzetes hengerlés miatt, amely a húzást követően lecsökkent. A feszültségcsökkentő hőkezelés és az újrakristályosítás további, kismértékű maradó feszültségcsökkenést okozott. A nem teljesen homogén alakváltozás következtében nyírófeszültség komponensek is mérhetőek voltak a próbatestekben.

Az 5. próbatest röntgendiffrakciója során kapott eredmények

2. táblázat

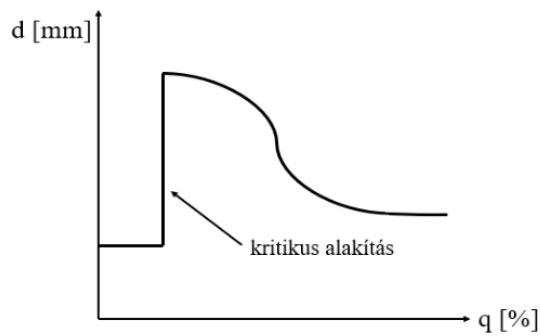
	σ [MPa]	τ [MPa]	FWHM [°]
alapállapotú	-144,3	-40,7	1,69
hidegalakítás	75,5	32,2	2,4
feszültségcsökkentő hőkezelés	13,9	8,7	2,3
újrakristályosodás	12,3	12,3	2,2

3.4. Átlagos szemcseméret-meghatározás és mikrokeménység- mérés

A szoftveres kiértékelés a Rosiwal-módszerrel történt. Az 1., 2. és 11. újrakristályosított lemezeket a 4. ábra vízszintesbe simuló szakasza jellemezte az alapállapotú lemezek előzetes nagymértékű hidegalakítása miatt. Az 5. próbatestnél az újrakristályosítás hatására csak minimális változás tapasztalható az alapállapotú szemcseméretre képest. A szinte változatlan szemcseméret alapján feltételezhető, hogy az 5. próbatest csak részlegesen kristályosodott újra, mert a kritikus alakítási küszöböt nem érte el a hidegalakítás során. Ebből következik, hogy az 5. próbatestet a 4. ábra kritikus alakítás előtti, vízszintes szakasza jellemzi. A 13. próbatest esetében az újrakristályosítást követően minimális előzetes deformáció esetén ugrásszerűen megnő a szemcseméret, majd az előzetes hidegalakítás mértékének növelésével csökken a szemcsék mérete. Így a 13. próbatest a kritikus alakítás feletti teljes tartományt jól jellemzi [6].

A hidegalakított próbatesteknél az alakítási keményedés hatására nőtt a lemezek keménysége. A feszültségcsökkentő hőkezelés keménységre gyakorolt hatása csekély. A mikrokeménység-értékek az újrakristályosítás után az előzetes hidegalakítás mértékétől függetlenül beállnak egy közel állandó, az alapállapotú próbatest keménységéhez közeli értékre. Ennek oka, hogy az újrakristályosodás során az

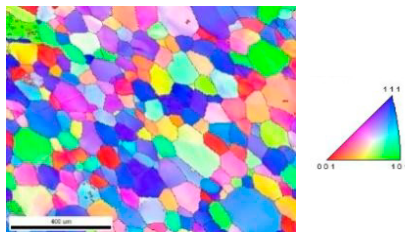
anyagban új, diszlokáció- és feszültségmentes szemcsék jönnek létre, melyek az anyag lágyulását eredményezik, és a keménység az alapállapotú minta keménységéhez közeli értéket vesz fel [7].



4. ábra. Az újrakristályosodás során létrejövő szemcsék átmérője az előzetes képlékeny hidegalakítás mértékének függvényében

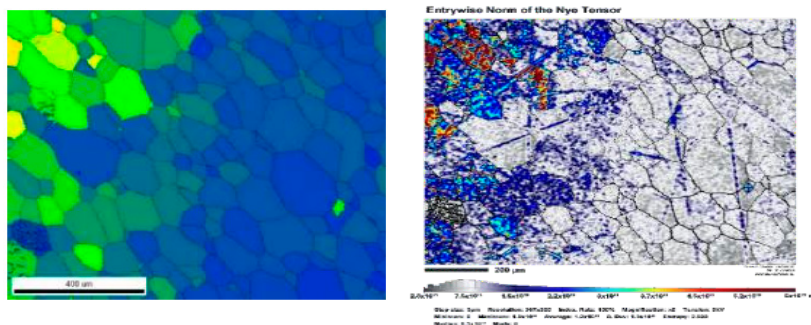
3.5. Visszaszórtelektron-diffrakciós vizsgálat

Az alapállapotú, maximális mértékben hidegalakított, feszültségsökkentő hőkezeléssel kezelt és újrakristályosított 5. próbatestet vizsgáltuk visszaszórtelektron-diffrakciós méréssel. Hidegalakítás hatására nő a GAM paraméter értéke, ami a szemcsén belüli pontok orientációjának átlagos különbségét jelenti. A feszültségsökkentő hőkezelés hatására a diszlokációk egy része kioltódik, ami magyarázza a GAM érték csökkenését a hidegalakított állapothoz képest. Az 5. próbatest nagyobb hőmérsékletű hőkezelése után a hidegalakításhoz képest alig csökken a szemcsén belüli pontok közötti orientációeltérés, ami igazolja az 5. próbatest részleges újrakristályosodását. A geometriailag szükséges diszlokációk száma, a GND hidegalakítás után megnő, a kisebb hőmérsékletű hőkezelés után lecsökken. Az újrakristályosító hőkezelés után ismét megfigyelhető a GAM értékeknél leírt tendencia, hiszen a nagyobb diszlokációsűrűség nagyobb rácstorzulást, és így nagyobb orientációeltérést okoz a szemcsén belüli pontok között. Az 5. ábrán az inverz pólusábra látható. Az egyes pontok kristályorientációját a kiválasztott mintairányhoz viszonyítva ábrázolják, a színek pedig jelzi, hogy melyik rácsirány áll a legközelebb ehhez az irányhoz [8].

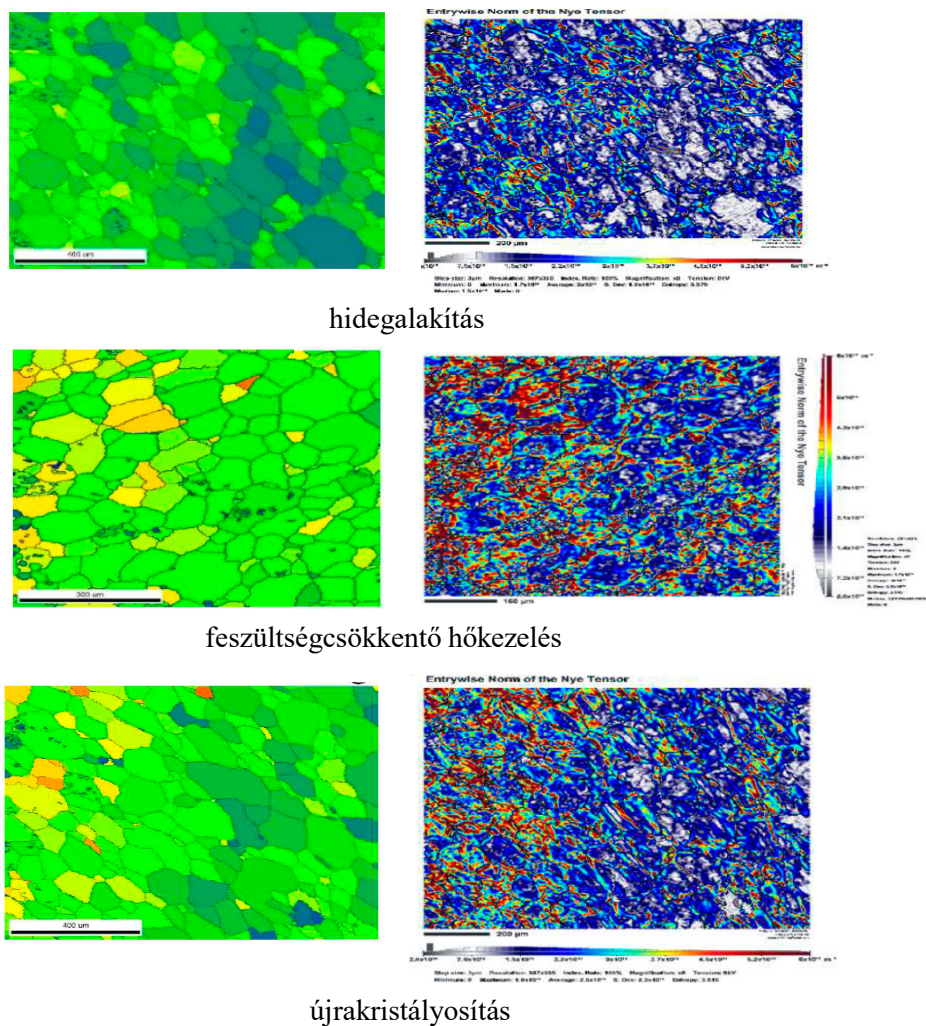


5. ábra. Orientációs térkép

Az egyes állapotok GAM értékeihez tartozó diagramjai az 6. ábra bal oldali oszlopában, a GND értékek diagramjai a jobb oldali oszlopában láthatók. A GND ábrákon feltüntetett színskála a geometriailag szükséges diszlokációk sűrűségét jellemzi $\frac{1}{m^2}$ mértékegységben. Ehhez hasonlóan a GAM ábrákon a szürke szín jelzi legkisebb, a piros a legnagyobb orientáció különbséggel rendelkező területeket. Megfigyelhető, hogy a kis, illetve nagy orientációkülönbségű területeken hasonlóan kis, illetve nagy diszlokációsűrűség figyelhető meg.



alapállapot



6. ábra. Az EBSD-mérés eredményei

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatómunka során különböző anyagvizsgálati módszerek alkalmazásával a hidegalakítás és a hőkezelés transzformátorlemezek mechanikai, mágneses és mikroszerkezeti tulajdonságaira gyakorolt hatását a próbatesteken négy állapotban sikeresen megvizsgáltuk.

A mérések során olyan eredmények is születtek, amelyek okának megértése további vizsgálatokat igényel. A hidegalakítás mértékének növekedése és a Barkhausen-zaj RMS-értékek csökkenése közötti összefüggés tisztázott, azonban az értékek közötti csekély különbség okának felderítéséhez kiegészítő mérések szükségesek. Az újrakristályosítás hiszterézisveszteségre gyakorolt hatásának feltárása szintén további vizsgálatokat indokol.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítástani és Nanotechnológiai Intézetét a röntgendiffrakciós mérés elvégzéséért.

Köszönöm Lorenzo Nicoletti hallgatótársamnak a közös munkát és a mérések során nyújtott segítségét.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Xiong, X., Hu, S., Dang, N., Hu, K., Effect of stress-relief annealing on microstructure, texture and hysteresis curve of mechanically cut non-oriented Fe-Si steel, *Materials Characterization*, 132, 2017, pp. 239–247.
- [2] Krause, T. W., Pattantyus, A., Atherton, D. L., Investigation of magnetic Barkhausen noise in steels, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995.

- [3] Moorthy, V., Shaw, B. A., Hopkins, P., Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised steel. *Acta Materialia*, Elsevier, 2005, 53(2), 499–508.
- [4] Jiles, D. C., Dynamics of magnetic domain walls and of magnetic Barkhausen noise. *Czech Journal of Physics*, 50(8), 2000, pp. 893–924.
- [5] Ungár, T., Dislocation densities, arrangements and character from X-ray diffraction experiments. *Materials Science and Engineering A*, Elsevier, 2004, 387–389, 292–297.
- [6] Humphreys, F. J., Hatherly, M., *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Elsevier, Oxford, 2004.
- [7] Honeycombe, R. W. K., Bhadeshia, H. K. D. H., *Steels: Microstructure and Properties*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006.
- [8] Randle, V., Engler, O., *Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture and Orientation Mapping*, CRC Press, 2000.