

RENKÓ JÓZSEF BÁLINT – ROMANENKO ALEKSZEJ – SZABÓ PÉTER JÁNOS –  
PETRIK PÉTER – BONYÁR ATTILA

## Színesen maratott ferrites acél vizsgálata spektroszkópiai ellipszometriával

*A színes maratás gyakran használt szövetszerkezet-előhívó eljárás a metallográfiában. Bár régóta alkalmazzák sikerrel, a maratás során lejátszódó kémiai folyamatok precíz feltárása eddig nem történt meg. Cikkünkben azoknak a spektroszkópiai ellipszometriai vizsgálatoknak az eredményeit ismertetjük, amelyeket ferrites acélon a színes maratás során kialakuló réteg tulajdonságainak vizsgálata céljából végeztünk. A vizsgálatok megerősítették a rétegépülés sebessége és a szemcseorientáció között korábban feltételezett kapcsolatot.*

### 1. Bevezetés

A különböző maratási eljárások nagyon kedvelt és gyakran használt eljárások a metallográfiában [1, 2]. Elterjedésüket főként annak köszönhetik, hogy gyors és egyszerű megoldást kínálnak a különböző polírozott minták szemcseszerkezetének előhívására. A marószerek reakcióba lépve a minta felületével megváltoztatja annak domborzatát, láthatóvá téve ezzel az egyes szemcséket, szemcsehatárokat. Bár felhasználási területüket tekintve nem sok különbség mutatkozik az egyes eljárásváltozatok, ill. a különböző marószerek között, hatásmechanizmusuk szerint két fő csoportba sorolhatók.

Az első csoportba a jellemzően savas pH-jú, kémiai marószerek tartoznak. Ezek a minta felületével reakcióba lépve a minta felületének különböző pontjain eltérő sebességgel oldják be a vizsgált minta anyagát az oldatba. Az előhívást, vagyis a mikroszerkezet láthatóvá tételét így az egyes szemcsék, illetve a szemcsék belseje és a szem-

csehatárok maródásának sebességkülönbsége okozza [3, 4]. Az első esetben a szemcsék, kristálytani orientációjuktól függően különböző mélységben maradnak meg, így a beeső fényt eltérő intenzitással verik vissza a megfigyelő irányába (diszlokált reflexió). A második esetben a szemcsehatárokon az atomok rendezetlensége miatt azok könnyebben tudnak kioldódni a fémrácsból, így az onnan kilépő kisebb fényintenzitás miatt a határok vonalszerű szerkezete láthatóvá válik. A folyamat a marószertől függően néhány másodpercet, legfeljebb néhány percet vesz igénybe.

A második csoportba az úgynevezett színes marószerek tartoznak [5]. Elterjedésüket tekintve gyakran használt előhívó eljárások ezek is, ám – összehasonlítva a kémiai marószerekkel – lényegesen kevesebbet használják őket. Ennek oka, hogy a színes maratás során használt sóoldatok kevésbé agresszívek, így egyrészt kevesebb típus áll rendelkezésre, másrészt pedig a megfelelő hatás elérése lényegesen tovább tart. A minimum néhány percg tar-

**Renkó József Bálint** 2016-ban végzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépész Karán mint gépészmérnök, majd 2019-ben szerezte meg mesterdiplomáját okleveles gépészmérnökként. Tanulmányait jelenleg a Műegyetem Pattantyús Ábrahám Géza Műszaki Tudományok Doktori Iskolában folytatja doktorandusként. Kutatási területe a fémes anyagok színes maratással történő vizsgálata.

**Romanenko Alekszej** 2016-ban végzett az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán mint fizikus biofizika szakirányon, majd 2018-ban szerezte meg diplomáját, mint okleveles anyagkutató. Jelenleg az Eötvös Loránd Tudományegyetem Hevesy György Kémia Doktori Iskolájában tanul doktorandusként, munkáját az Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében végzi. Kutatásának fő területe a bioellipszometria és mérés technika fejlesztés. Emellett kutatásokat végez fémek és fémes anyagok hőkezelésében és oxidációjában.

**Szabó Péter János** 1992-ben szerzett villamosmérnöki oklevelet a Budapesti Műszaki Egyetemen, majd 1995-ben PhD-fokozatot nagyfelbontású röntgen vonalprofil-analízis témakörből. MTA doktori értekezését, 2013-ban védte meg, ugyanabban az évben

habilitált. Jelenleg a BME Gépészmérnöki Kar Anyagtudomány és Technológia Tanszék egyetemi tanára.

**Petrik Péter** az Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének tudományos tanácsadója, a Fotonika Laboratórium vezetője. Diplomája (BME, 1994), PhD-értekezése (BME, 2000) és MTA doktorija (2015) egyaránt optikai vizsgálati módszerek fejlesztéséhez és anyagtudományi alkalmazásához kötődik. Vendégkutatóként összesen közel öt évet töltött Németországban, az USA-ban és Hollandiában. Jelenleg vékonyrétegek és szilárd-folyadék határfelületek folyamatkövető vizsgálati módszereinek fejlesztésével foglalkozik.

**Bonyár Attila** 2009-ben szerzett okleveles villamosmérnök diplomát, 2011-ben okleveles egészségügyi mérnök diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karán. 2013-ban szerzett PhD-fokozatot fémes nanoszerkezetek AFM-es vizsgálata témakörben. 2021-ben habilitált plazmonikus elvű bioérzékelők fejlesztése témakörben. Szakterülete a nanotechnológia, fémes nanoszerkezetek, nanometrológia (AFM), plazmonika és a bioérzékelők. Jelenleg a BME Elektronikai Technológia Tanszékének egyetemi docense.

tó színes maratás során a használt, jellemzően fémsóoldat reakcióba lép a minta felületével, majd azon egy vékony, átlátszó csapadékréteget képez. A réteg a minta eredeti síkjához képest mindkét irányba növekszik, ahogy egyre több anyagot old be a mintából és a marószorból. A film növekedésével az egyes szemcsék színe az interferencia-kritériumnak megfelelő ciklikus színváltozáson megy keresztül [6].

Habár a különböző maratási eljárások széles körben használtak, a maratás során lejátszódó kémiai folyamatok ismerete nem, vagy csak minimális mértékben szükséges az előhíváshoz, így azok egy jelentős része máig feltérképezetlen. A maratás jelenségének megértésére tett vizsgálatok relatíve új irányt képviselnek az anyagtudományban, többségük az elmúlt évtizedhez köthető. Egy részük a kialakult réteg kémiai összetételét, felépítését célzó vizsgálatokat mutatja be. Ilyen például a kémiai és elektro-kémiai maratás útján létrehozott GaAs-alapú vékonyrétegek szerkezetét, kémiai összetételét feltáró kutatás, amit 2016-ban *Youcef és társai* publikáltak [7]. Mások a színes maratás során kialakult réteg és a szemcseorientáció között feltárt korreláció mélyebb megértésére tettek erőfeszítéseket. Az egyes kristallitok színe és orientációja közötti kapcsolatot először 2010-ben vetette fel *Kardos és Szabó*, akik a maratás után az egyes szemcsék színét és intenzitását vetették össze a visszaszórtelektron-diffrakciós (EBSD) vizsgálattal meghatározott <100> főirány és a minta felszíne által bezárt szöggel [8]. 2012-ben igazolást nyert, hogy a színes maratás közben kialakult csapadék vastagsága szemcsénként eltérő, ráadásul az a minta eredeti síkjához képest mindkét irányba növekszik [9]. *Britz és társai* a folyamat megértését más irányból próbálták megvizsgálni. Egyedi inkubátorrendszerrel építettek, majd a berendezést több lépésben továbbfejlesztve képesek voltak a maratási folyamatot jól szabályozható körülmények közt tartani [10, 11]. Az inkubátornak köszönhetően jól reprodukálható maratásokat tudtak végrehajtani LePera reagenssel kis méretű szénacél mintákon. A reprodukciós probléma kiküszöbölésével azonban a lejátszódó folyamatok továbbra sem lettek feltárva.

Az orientációnként különböző vastagságú rétegről rendelkezésre álló ismeretek kibővítésére 2019-ben megalkottunk egy olyan komplex mérési és kiértékelési módszert, amelyben egy előzetes kalibrációt követően (amely során a szemcsék fölött kialakuló interferáló réteg vastagságát atomi erőmikroszkópiával határozzuk meg) a szemcseorientáció közvetlenül a színes maratásból meghatározhatóvá válik. A kidolgozott modell lehetőséget teremtett, hogy kiszámítsuk az egyes szemcsékhez tartozó átlagos maratási sebességeket, majd azokat a megfelelő orientációkhoz rendeljük. A modellt felhasználva sikerült pusztán színes maratás optikai megfigyelésével meghatározni ugyanazon minta egy véletlenszerűen választott területén az egyes szemcsék felszínének a [100] és [111] főirányokkal bezárt szögeit, 3-5°-os átlagos abszolút hibával, az EBSD mérésekhez, mint referenciához viszonyítva [12].

Munkánk során arra kerestük a választ, hogy a spektroszkópiai ellipszometria alkalmas-e a maratás során

kialakuló réteg vizsgálatára, valamint a korábban kidolgozott módszertan eredményeit meg tudja-e erősíteni a vele történő mérés.

## 2. Kísérletek

### 2.1. Felhasznált anyagok és előkészítés

Az eredeti módszertan kidolgozásához vizsgálati alapanyagként gömbgrafitos öntöttvasat (GGÖV) használtunk [12]. A grafitkiválásoknak köszönhetően ugyanaz a terület könnyedén beazonosítható, így a polírozott felület egyes részei visszakereshetők. Marószernak Beraha I. oldatot választottunk, ami 3 g  $K_2S_2O_5$ , 10 g  $Na_2S_2O_2$  100 ml desztillált vízben történő feloldásával állítható elő. A Beraha I. az alapanyagban található ferrittel lép kölcsönhatásba, a felületből beoldva hozza létre a maratás során kialakuló csapadékot [13].

A spektroszkópiai ellipszométer által pásztázható legkisebb átmérő a használni kívánt beállítások mellett kb. 0,2 mm, ami öntöttvas esetében nem megfelelő, ugyanis a vizsgált öntöttvas szemcsenagysága ennél körülbelül egy nagyságrenddel kisebb. Ahhoz, hogy az egyes szemcsék közvetlen mérése lehetővé váljon, az alapanyag módosítására volt szükség. Annak érdekében, hogy a marószert megváltoztatása nélkül folytathassuk vizsgálatunkat, a kis karbontartalmú, DC01 ferrites acélt választottuk alapanyagul. A módszertan validáláshoz választott ferrites acél emissziós spektroszkópiával mért kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. DC01 ferrites acél kémiai összetétele [atom%]

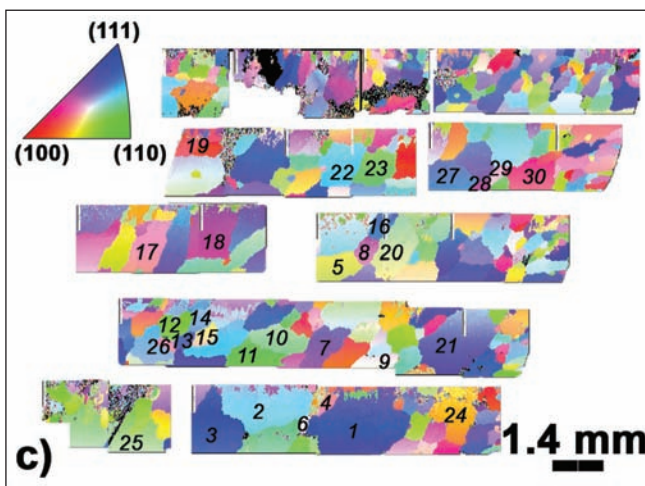
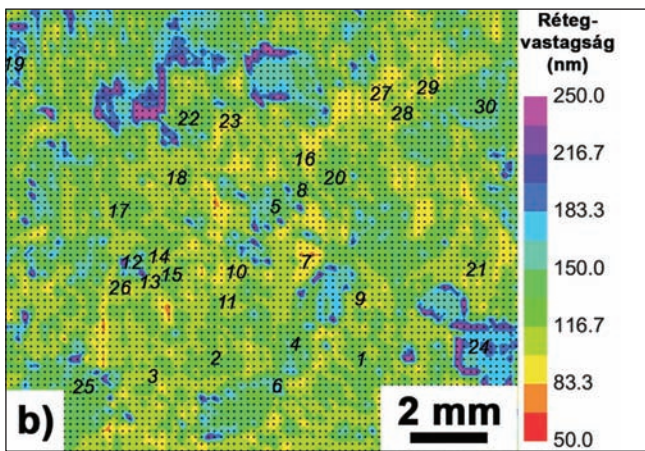
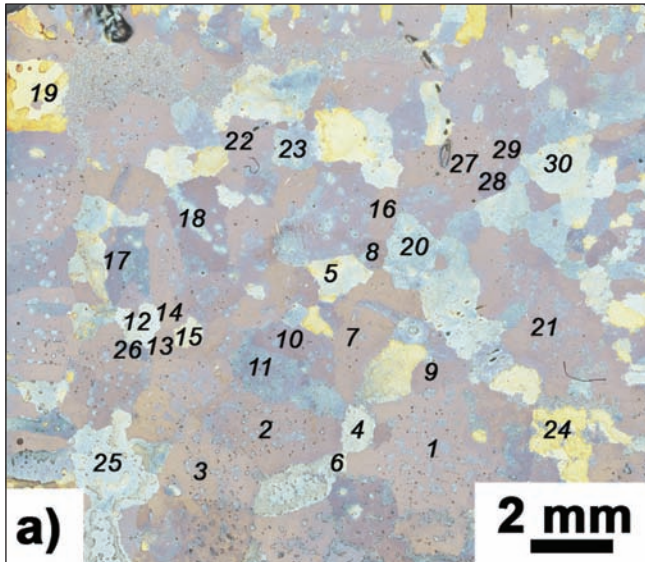
Fe	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
98,9	0,092	0,616	0,081	0,013	0,034	0,064	0,017	0,118	0,065

A spektroszkópiához szükséges szemcseméret eléréséhez a DC01 anyagú mintát 850 °C-ra hevítettük, majd 0,5 óra hőntartás után a kemencében hagytuk lehűlni, így biztosítva a szemcsedurvuláshoz szükséges lassú hűtést [14]. A lágyítás hatására a mintán szabad szemmel is észlelhető 1-3 mm-es szemcsék képződtek. A további vizsgálatok klimatizált laborokban történtek, a hőmérséklet mindenhol 24 °C volt.

Bár az alapanyag-marószert párosítást megváltoztattuk, mind az előkészítés, mind a maratás közel azonos körülmények között zajlott. Az eredményeknél látható lesz, hogy az alapanyag eltéréseinek ellenére ugyanazt a konklúziót tudjuk majd levonni ferrites acélnál is, mint az öntöttvas esetében.

### 2.2. Spektroszkópiai ellipszometria

A spektroszkópiai ellipszometria során ismert polarizációjú fényrel világítjuk meg a minta felületét, és a visszaverődés során bekövetkező polarizációváltozást mérjük. Mivel a módszer képes a két polarizációs irány közötti fáziskülönbséget meghatározni, ezért a hagyományos reflektometriánál jóval érzékenyebb, így akár 1 Å felbontás is elérhető. Ezen kívül az optikai sűrűség (törésmuta-



■ 1. ábra. A színesen mart felületen kijelölt szemcsék optikai mikroszkópos felvétele (a), spektroszkópiai ellipszometriával meghatározott rétegvastagság-térképe (b), valamint a visszászórtelektron-diffrakcióval meghatározott inverz pólusábrája (c)

tó) 0,001 Å felbontással meghatározható [15].

A mérés egy pontban akár pár másodperc alatt elvégezhető egy széles spektrális tartományban, ami lehetővé teszi összetett rétegszerkezetek modellezését és paramétereinek meghatározását. A gyors mérés következtében nagyobb felületek térképezésére is lehetőség van belátható, reális időn belül.

A gyantába ágyazott mintákat egy Woollam M-2000 DI forgó kompenzátoros spektroszkópiai ellipszométer munkasztalára helyeztük, amelynek hullámhossztartománya 190 nm és 1690 nm közötti. Mivel a térképezés során a minta elmozdulhat, azt minden egyes térképezés előtt rögzíteni kellett. A mérések minden egyes pontban összesen  $2 \times 16$  s-ig tartottak, a lépésköz 175  $\mu\text{m}$  volt. A mérésekhez fókuszlót használtunk, így az általunk használt nagy beesési szög miatt ( $70^\circ$ ) a folt megnyúlt a beesési sík irányában.

Mivel az ellipszometria rendkívül felületérzékeny módszer, az anyagok tömbi törésmutatójának meghatározásakor elsődleges fontosságú a felület megfelelő figyelembevétele. Sajnos esetünkben nem feltételezhetjük, hogy a hordozó törésmutatója azonos, és csak a felületi réteg vastagsága különbözik. A különböző irányokban orientált szemcsék más optikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Olyan optikai modellt alkottunk, amelyben minden mérési pontban az acél alapanyagot úgynevezett Lorentz-oszcillátorokkal írtuk le. A felületi réteg törésmutatójának hullámhossz-függését egy egyszerű Cauchy-diszperzióval jellemeztük [16, 17].

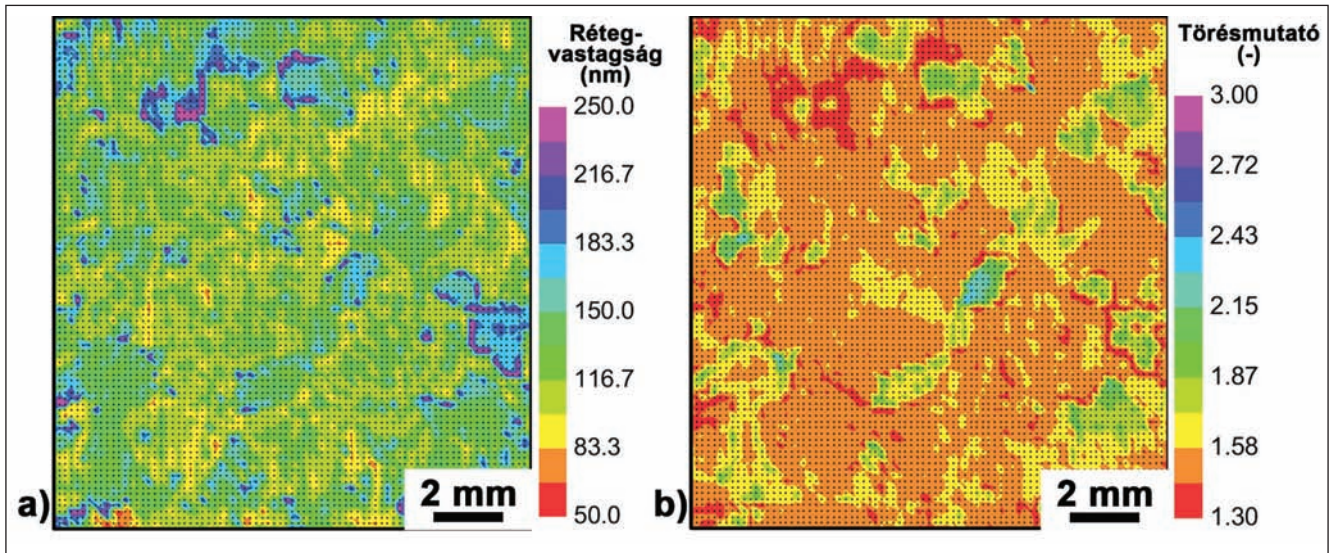
### 2.3. További berendezések

A színes maratásról készült felvételek egy Olympus BX51 optikai mikroszkóphoz csatlakoztatott DP72 digitális kamerával készültek.

Az EBSD-vizsgálatokat egy Philips XL-30 pásztázó elektronmikroszkóphoz csatlakoztatott TSL-EDAX EBSD-rendszerrel végeztük. Mivel a berendezés legkisebb felbontásával az elérhető képméret megközelítőleg  $1500 \times 1500 \mu\text{m}$ , így a felület teljes pásztázásához több tucat felvételre volt szükség. A vizsgált felület inverz pólusábrái egymás mellé illesztve az 1. ábrán láthatók. A pólusábránál az enyhe torzulás a  $70^\circ$ -os döntött szögben történő döntött képrögzítés és a korrekciós szoftver bizonytalanságaiból adódik.

### 3. Eredmények és diszkusszió

A vizsgált felületen a maratást követően 30 szemcsét jelöltünk ki, amelyek mindegyike egyértelműen beazonosítható volt az EBSD és ellipszometria felülettérképein is (1. ábra). A három felvétel összehasonlításakor látható, hogy a szemcséken kialakuló, legfeljebb néhány száz nanométeres felületi réteg az egyes kristallitokat jól beazonosíthatóvá teszi. A hasonló színű szemcsék rétegvastagsága és szemcseorientációja közel azonos. Erre példa lehet az 1. és 3. sorszámú szemcsék, vagy éppen a 12. és 23. sorszámú szemcsék összehasonlítása. A vizuális adatok megerősítik a korábbi cikkünkben megfogalmazottakat, miszerint a rétegvastagság és a maratásról készült optikai mikroszkópos felvételek alapján meghatározható az egyes szemcsék maratási sebessége [12]. Az így kapott sebességértékeket összevetve az EBSD-felvételekkel, a maratási sebességek orientációhoz rendelhetők, ennek következtében pedig későbbi vizsgálatok során tisztán az optikai mikroszkópos felvételekből jó közelítéssel meghatározható lesz az egyes szemcsék orientációja.



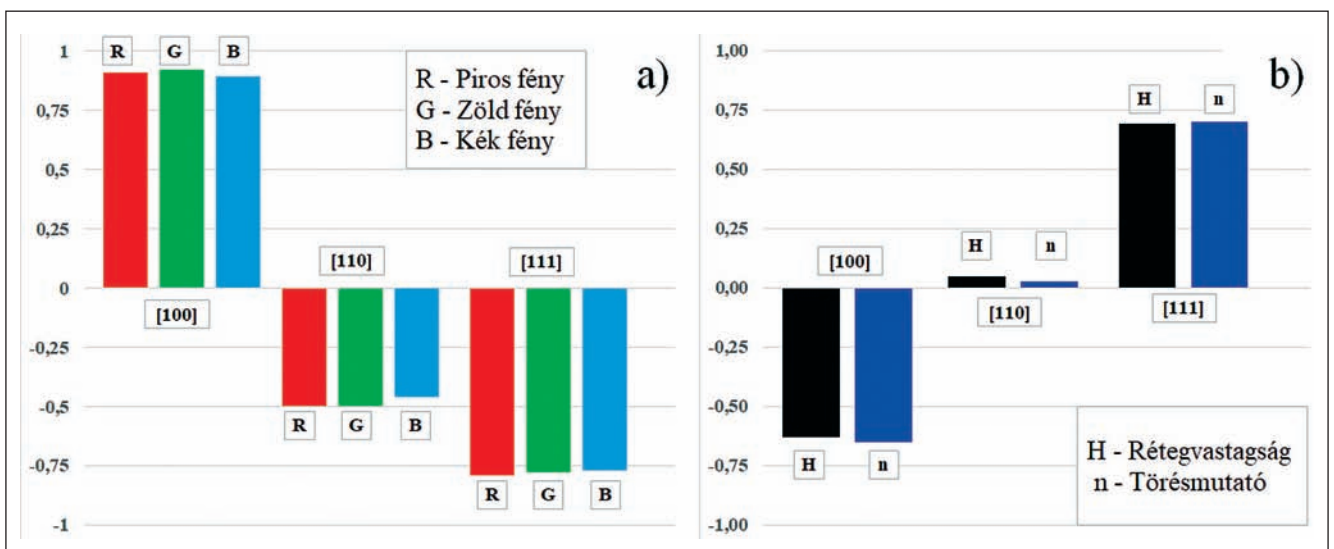
■ 2. ábra. Spektroszkópiai ellipszometriával mért, homogén felületi réteget feltételező modell alapján a vizsgált terület egyes pontjaiban kapott rétegvastagság (a) és törésmutató (b)

Az ellipszometria eredményeire illesztett homogén réteget feltételező modell alapján meghatároztuk a réteg törésmutatóját és vastagságát az egyes mérési pontokban (2. ábra). Mivel az ellipszometriával pásztázható legkisebb terület mérete adott, így az egyes szemcsehatárok csak akkor válnak egyértelműen beazonosíthatóvá, ha a szemcsék ennél lényegesen nagyobbak. A szemcsehatárokon vagy kis méretű kristallitok esetén a szomszédos szemcsék átlagát határoztuk meg.

A 2019-es tanulmányban publikáltak szerint a színes maratás során mért normál színintenzitás az egyes szemcsék esetében lecsengő koszinuszos jellegű volt. A különböző orientációjú szemcsék intenzitásgörbéit összehasonlítva, a különbséget az egyes szélsőértékek eléréséhez szükséges idő adta. Azok a szemcsék, amelyek orientációja az [100] főiránnyal kisebb szöget zárt be, gyorsabban maródtak, vagyis az intenzitásgörbéken hamarabb elérték az egyes szélsőértékeket [12].

A különböző hullámhosszú fénykomponensek (azaz különböző színek, vizsgálatunkban vörös, zöld és kék) esetében az öntöttvas mintán az első minimum eléréséhez szükséges idő és a kristálytani főirányokkal bezárt szög korrelációját a 3a ábra mutatja. Az [100] főirány esetén tapasztalható erős pozitív korreláció arra enged következtetni, hogy minél kisebb a bezárt szög az [100] főirány és a vizsgált szemcse felületi normálisa között, annál kevesebb idő szükséges az első minimum eléréséhez, következésképpen annál gyorsabban maródik az adott kristallit. Az [111] főirány és a maratási idő között fordított a korreláció, valamivel gyengébb, de még mindig számottevő. Az [110] főiránnyal bezárt szög esetén a korreláció mértéke 0,5 alatti, így bizonytalan.

A ferrites acélon végzett ellipszometria vizuális eredményeinek számszerűsítésére a kiválasztott szemcsék esetében megvizsgáltuk a korrelációt a három kristálytani főiránnyal bezárt szög, valamint a rétegvastagság



■ 3. ábra. A korábbi mérések alapján korreláció azonos rétegvastagság eléréséhez szükséges idő és a szemcseorientáció főirányokkal bezárt szöge között, a három fő színtkomponensre összevetve (a), valamint az ellipszometria alapján számolt korreláció a szemcseorientáció főirányokkal bezárt szöge és a törésmutató, illetve a rétegvastagság között (b)

és törésmutató között (*3b ábra*). Az [110]-val bezárt szög szinte semmilyen korrelációt nem mutat, ami össze-  
cseng az előző mérés bizonytalanságával. A korreláció az [100] és [111] főiránnyal bezárt szög és a törésmuta-  
tó, illetve az azzal szoros kapcsolatban álló rétegvastag-  
ság között közel azonos erősségű volt, mint a korábbi  
vizsgálatoknál. A fordított jelleg azzal magyarázható,  
hogy minél nagyobb az adott főiránnyal bezárt szög,  
annál lassabb lesz a maródás, következésképpen pedig  
annál kisebb lesz a kialakuló réteg vastagsága. Ez pedig  
ismételten megerősíti a korábbi mérések és állítások  
eredményét.

#### 4. Összegzés

Spektroszkópiai ellipszometriával sikerült megmérni a szí-  
nes maratás során kialakuló réteg törésmutatóját és vas-  
tagságát is, új eszközzel bővítve az erre alkalmas beren-  
dezések sorát. A mérés eredményei összhangban vannak  
a korábbi megállapításokkal. A maratás kristályorientáció-  
tól függő marási sebessége leginkább az [100] kristálytani  
főiránnyal bezárt szöggel korrelál, vagyis a marási sebes-  
ség annál gyorsabb, a kialakuló réteg pedig annál vasta-  
gabb, minél kisebb szöget zár be egy szemcse felületi nor-  
málisa az [100] iránnyal. Az ellipszometriával történő  
mérés emellett a kisebb mértékű, de fordított korrelációt az  
[111] iránnyal, valamint a korreláció hiányát az [110] irány-  
nyal is megerősítette.

#### Köszönetnyilvánítás

Az itt bemutatott munka az Innovációs és Technológiai  
Minisztérium ÚNKP-2021-3-II-259 kódszámú Új nemzeti  
Kiválóság programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési  
és Innovációs Alapjából finanszírozott, valamint a  
K131515 számú OTKA téma szakmai támogatásával  
készült.

#### Irodalom

- [1] G. Petzow: Metallographic Etching, 2nd Edition: Techniques for Metallography, Ceramography, Plastography, ASM International, 1999, ISBN 1615032207, 9781615032204, 1–240.
- [2] E. Beraha: Ätzmittel zur Sichtbarmachung chemischer und physikalischer Inhomogenitäten in Stahlgefügen, Prakt. Metallogr., vol. 4, no. 8, 1967, 419–420.
- [3] E. Beraha: Ätzmittel zur Identifizierung von Sulfideinschlüssen in Eisen und Stahl und zur Unterscheidung von Phosphid und Zementit in Gußeisen, Prakt. Metallogr., vol. 6, no. 9, 1969, 565–568.
- [4] H.D. Um, N. Kim, K. Lee, et al.: Versatile control of metal-assisted chemical etching for vertical silicon microwire arrays and their photovoltaic applications, Sci Rep 5, 2015, 11277
- [5] E. Beraha: Farbätzung für Gußeisen, Stähle, Werkzeugstähle, Manganstähle und ferritische und martensitische rostfreie Stähle, Prakt. Metallogr., vol. 8, no. 9, 1971, 547–550.
- [6] S. Chen, M.-L. Giorgi, J.-B. Guillet, G. Geneste: Oxidation and diffusion processes at the Mn-doped Fe(100) and Fe(110) surfaces from first-principles, Applied Surface Science 258, 2012, 8613–8618.
- [7] Y. A., Bioud, A. Boucherif, A. Belarouci, et al.: Chemical Composition of Nanoporous Layer Formed by Electrochemical Etching of p-Type GaAs, Nanoscale Res Lett 11, 2016, 446.
- [8] P. J. Szabó, I. Kardos: Correlation between grain orientation and the shade of color etching, Mater. Charact. 61 (08), 2010, 814–817.
- [9] A. Bonyár, P. J. Szabó: Correlation between the Grain Orientation Dependence of Color Etching and Chemical Etching, Microscopy and microanalysis: the official journal of Microscopy Society of America, Microbeam Analysis Society, Microscopical Society of Canada. 18. 2012, 1–4.
- [10] D. Britz: Opening the door to fundamental understanding of structure and color metallography – a correlative microscopy study on steel, Microsc. Microanal., 834, 2014, 1431-9276 1435-8115 20
- [11] D. Britz: Reproducible surface contrasting and orientation correlation of low-carbon steels by time-resolved Beraha color etching, Mater. Perform. Characterization 5 (5), 2016, 553–563.
- [12] A. Bonyár, J. Renkó, D. Kovács, P. J. Szabó: Understanding the mechanism of Beraha-I type color etching: Determination of the orientation dependent etch rate, layer refractive index and a method for quantifying the angle between surface normal and the  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$  directions for individual grains, Mater. Char., Vol. 156, 2019, 109844
- [13] E. Beraha: New metallographic reagents for stainless steel and heat-resisting alloys, J. Iron Steel Inst., vol. March, 1966, 248–251.
- [14] E. Kiss, J. Gulyás, et. al.: Képlékeny alakítás, Budapest, Tankönyvkiadó, 1987, 95–100.
- [15] T. Lohner, M. Serényi, P. Petrik: Characterization of sputtered aluminum oxide films using spectroscopic ellipsometry, Intern. J. of New Horizons in Phys., 2 (1), 2015, 1–4.
- [16] H. G. Tompkins, J. N. Hilfiker: Spectroscopic ellipsometry: Practical application to thin film characterization, Momentum Press, LLC, New York, 2016, 31–55.
- [17] H. Fujiwara: Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2007, 81–120.