

# Amorf és nanokristályos lágymágneses anyagok bevezethetőségének vizsgálata gépjármű elektromotorok gyártásába

*Napjainkban az elektromos motorok hatékonyságával szemben is egyre szigorodó előírások lépnek életbe. A lágymágneses anyagok körébe tartozó amorf és nanokristályos szalagok kedvező mágneses tulajdonságaikkal vonzó alternatívát jelentenek jobb hatásfokú elektromos motorok gyártásában is a hagyományos vas-mag alapanyagok helyett. A motorállórész pakettált szegmenseinek kialakításánál a fő technológiai problémát a kivágás jelenti, mivel nehézkes egy nagy alapkeménységű, koptató tulajdonságú vékony szalaganyag feldolgozásához megfelelő technológiát találni. Választásunk a pakettálandó szegmenslemezek, lamellák lézersugaras vágására esett, de ebben az esetben számolnunk kell a hőhatásövezet mechanikai és mágneses tulajdonságokra gyakorolt hatásával is. Különböző lézersugaras vágási eljárások után ezt a hőhatásövezet vizsgáltuk indirekt és direkt szerkezetvizsgálati módszerekkel.*

## Bevezetés

A járműiparban jelenleg az új kibocsátási előírások következtében folyamatosan csökken a belső égésű motorral gyártott autók piaci részesedése. A hibrid és a tisztán elektromos hajtások fokozatosan nyernek teret a piacon, aminek legnagyobb előnye a lokális emissziócsökkentés vagy akár -mentesség. Ezen cél elérése végett igény lett az elektromos járművek (EV electric vehicle) nagyobb volumenű gyártására. A nagy ipari gyártók folyamatosan keresik a megoldásokat az egyszerű konstrukciójú és nagyobb hatásfokú elektromotor minél termelékenyebb és olcsóbb gyártásához [1]. Az elektromotorokban található állórész (sztator) és forgórész (rotor) testek hagyományosan, túlnyomóan FeSi ötvözetű elektrotechnikai acélszalagokból kisajtott lemezcsomagok (pakettek). A különösen járműipari felhasználásra szánt elektromotorok hatásfokára vonatkozó elvárásokat még nehezebb teljesíteni a hagyományos elektrotechnikai szalagokkal.

Amorf szalagok a kedvezőbb tulajdonságaik (nagy permeabilitás, kis koercitív erő és a lényegesen nagyobb fajlagos ellenállás) által kiterjedt alkalmazásra leltek az elektronikában, híradástechnikában és az elektrotechnikában is kisebb-nagyobb transzformátorvasmagok gyártásában az 1970-es évekbeli megjelenésüktől kezdve. Mostanra már a legnagyobb AMT – amorf vasmaggal épített kb. 30 t súlyú leválasztó transzformátorok a 12 MVA teljesítményt is elérik (99,31%-os hatásfokkal/hatékonysággal) [2].

Amorf szalagok tömeggyártásra alkalmas technológiájának az alapja a fémolvadék nagyon nagy (1000 °C/sec)

hűlési sebesség mellett történő megszilárdulása nagy hővezető-képességű, gyorsan forgó fémhenger palástja mentén. A hőelvezetésnek, a lehűlés sebességének és a megszilárdulásnak az atomrendeződésnél gyorsabbnak kell lennie, hogy teljesen véletlenszerű maradjon az atomok elhelyezkedése egymáshoz képest, épp úgy, mint az olvadékokban [3].

Magyarországon a KFKI-ban kezdődtek kutatások a 70-es évek közepén, amorf lágymágneses anyagok előállítására és az amorf szerkezet tulajdonságainak megismerésére. A kísérletek hamarosan a Csepel Művek Fémműben folytatódtak, ahol alkalmazástechnikai kísérletek is folytak saját tervezésű és építésű félüzemi berendezéssel, amellyel max. kb. 50 mm széles szalagokat lehetett gyártani egy gyorsan forgó henger palástja mentén megszilárduló max. kb. 10 kg súlyú olvadékból, amit kerámiatégelyből kerámiafúvókán keresztül juttattak ki. Akkoriban a Fémműben gyártott nagy permeabilitású permalloy szalagok mágneses tulajdonságainak a reprodukálása volt az elsődleges cél ezzel a potenciálisan gazdaságosabb módszerrel [3].

Két nagy gyártó uralja mára az amorf és nanokristályos szalagok gyártását a lágymágneses anyagok kiváltására. A Metglas (mint a Hitachi Metals egy részlege) Conway-ben és Tokióban [4], az Advanced Technology and Materials Co. Ltd. Kínában [5]. Több százezer t amorf vasat gyártanak évente az igények nagy részének a kielégítésére a transzformátorgyártásban. A nanokristályos lágymágneses szalagok gyártástechnológiája formálisan ugyanaz, mint az amorf szalag esetében. Az alapösszetétel célszerű megválasztása mellett itt egy pótlólagos kristallizációs hőkezelés is kell, hogy kialakuljon a kívánt mágneses tulajdonságokat hordozó nanokristályos szerkezet.

Az EV-elektromos járművek motorjainál is nagy előnyökkel jár az amorf anyagok alkalmazása. Az amorf vas-mag kisebb vesztesége nagyobb hatásfokot (hatásfokot) eredményez. Mivel a veszteség kisebb, a tekercselés ohmikus vesztesége és a vas-mag tekercsét gerjesztő áram ennyivel nagyobbak tervezhető, ami a motor teljesítményét növeli. Mivel a veszteség alacsony marad magasabb működési frekvenciáknál, ezért nagy fordulatszámoknál is

**Nagy Márton** MSc-hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék.

**Dr. Bán Krisztián** egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék.

**Dr. Fogarassy Zsolt** tudományos főmunkatárs, Magyar Tudományos Akadémia Műszaki, Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet.

**Dr. Berényi Richárd** egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elektronika Technológia Tanszék.

hatékonyabbak a motorok az amorf vasmaggal. Az amorf gyártási technológiák fejlődésével szinte párhuzamosan a keménymágneses anyagok családjában is új anyagok jelentek meg. Ezek maradék (remanens) mágnesezettsége magas marad szinte bármilyen alak mellett, mert a koercitív erő, ami megakadályozza a vasmag saját mágnestere általi lemágneseződést, szinte eléri a fizikailag lehetséges maximumot. Ezek a FeCoSm, majd a FeNd összetételű mágnesek (a vas, a kobalt és a ritkaföldfémek ötvözetei). Ez nagyobb szabadságot ad az EV-motor geometriai felépítésének tervezésében az amorf szalagból felépítendő állórésznel is, miközben teljesítménynövelő hatása is van a forgórészgerjesztés feleslegessé válásával [3].

A Hitachi és más motorgyártók már fejlesztettek is ki gazdaságosan gyártható prototípusokat amorf szalagok felhasználásával [5][6][7]. A technológiai részletek azonban általában nem publikusak, ezekkel minden újonnan belépő fejlesztőnek meg kell küzdeni.

### A kísérletek leírása

Kísérleteink célja annak megállapítása, hogy lamellák ki-munkálása eszközeinkkel amorf szalagból milyen megoldással lehetséges állórész/forgórész pakettek számára.

Hagyományos szerkezetű lemezelte vasmagok amorf szalagból nem készíthetők a hagyományos technológiával. A kivágó prés szerszámát hamar elkoptatná a kemény üvegfém, ráadásul több mint 10-szer annyi kivágás kell egy azonos méretű csomaghoz, mint egy 0,35 mm vastag hagyományos elektrotechnikai acélszalag kivágásához. A megfelelő szerszám kialakítása is költségesebb lehet, mivel 20-25 mikrométer körüli vastagságúak a szalagok. Ennélfogva ez esetben más kivágási technológia bevezethetőségét kellett megvizsgálni.

A jelen kísérletekben a lehetséges vágástechnológiák közül a lézersugaras vágást választottuk, aminek hátránya a hőhatás, ami az amorf anyagok jelentős szerkezetváltozását okozhatja a hőhatásövezetben. Ezzel kedvezőtlen irányba módosulhatnak a legyártott lemezszegmens mágneses és mechanikai tulajdonságai a vágott szél kis környezetében. A kivágott lemez méretével összevetve, jelentéktelen lehet a mágneses tulajdonságok megváltozása okozta fluxuseloszlás-változás a légrésben.

Meghatározott méretű lágymágneses próbatestek lézeres vágás utáni hőhatásövezetének mikrokeménységi, metallográfiai, illetve nagy felbontású, pásztázó és transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatát hajtottuk végre a lehetséges szerkezetváltozások kimutatására a vágási élek mentén.

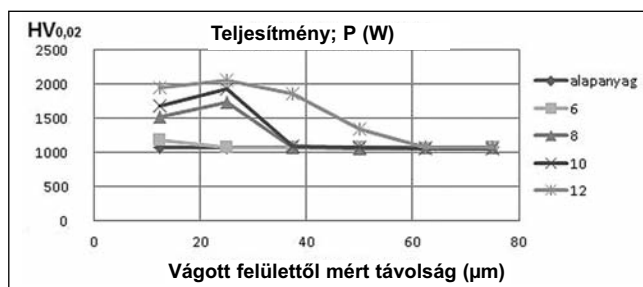
A METGLAS 2605SA1 jelzésű amorf szalagokból és a szintén Hitachi-METGLAS termék FINEMET nanokristályos szerkezetű szalagokból kivágott mintákon végeztük a kísérleteket.

Kísérleti ötvözetek néhány fizikai és mágneses tulajdonsága látható az 1. táblázatban.

A leglényegesebb tulajdonságuk, hogy a fajlagos veszteségeik nagyságrenddel alacsonyabbak, mint egy hagyományos 0,23 mm vastag M3 minőségű elektrotechnikai

1. táblázat. A vizsgált ötvözetek néhány fontosabb fizikai és mágneses tulajdonsága [2][4]

	METGLAS 2605SA1	FINEMET
Összetétel	Fe-Si-B	Fe73,5Nb3Cu1Si13,5B9
Méret (vágás után) (mm)	10 × 50	10 × 100
Vastagság (μm)	23	20
Telítési indukció (T)	1,5	1,23
Permeabilitás hőkezelés után (-)	600000	100000
Curie-hőmérséklet (°C)	395	570

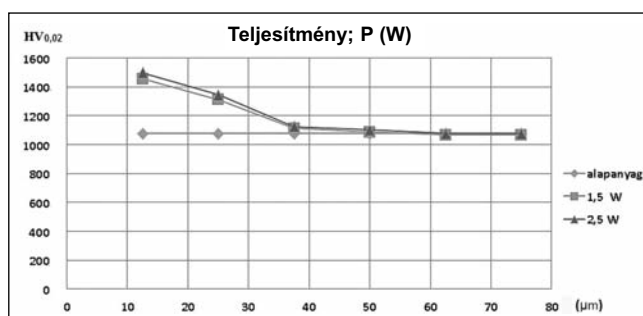


■ 1. ábra. Nd:YAG-lézervágás utáni METGLAS szalag mikrokeménység-értékei a vágott széltől való távolság függvényében [8]

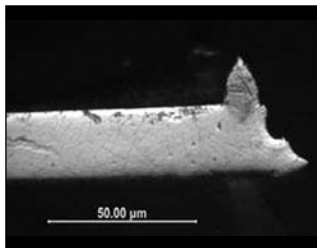
acél esetében (melynek vesztesége 1,7 T-nál, 50 Hz gerjesztésnél 0,9 W/kg).

Amorfszalagok hőhatásövezetében hő hatására a következő fázisátalakulások mennek végbe. A szalag közepétől a sorja felé haladva először szerkezeti relaxáció megy végbe, ahol az anyag marad amorf állapotú. Aztán elindul a kristályosodás az amorfszerkezet felbomlásával. Hő bevitelére a szerkezetben boridok jelennek meg, amik tovább bomlanak. Ezt érdemes elkerülni, hiszen ezzel a mágneses és mechanikai tulajdonságok is nagyot változnak az érintett környezetben.

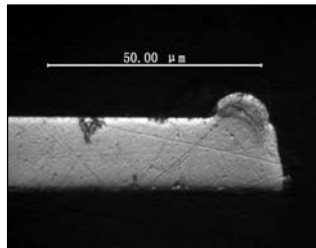
Eleinte folyamatos üzemű CO<sub>2</sub>-lézerral vágtuk el a mintákat, de hamar kiderült, hogy túl nagy hőhatásövezetet és rideg szalagszél eredményezett. Kisebbs teljesítményű, impulzusüzemű lézer alkalmazása kisebb hőhatásövezetet jelentett. Nd:YAG-szállézer különböző teljesítményszinttel vágott hőhatásövezetének keménységeloszlása látható az 1. ábrán. A vágott élről 12,5 μm-re készült az első lenyomat-sor, majd innen ugyanekkora távolságra a többi, így 3 × 4-es lenyomatmátrix keletkezett. A legkisebb hőhatás a 6 W-os vágási teljesítmény mellett alakult ki, aminek további paraméterei a 2500 kHz frekvencia, 160 mm/s vágási sebesség



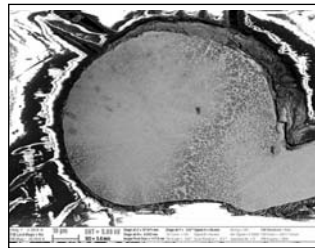
■ 2. ábra. Gravírlézerral vágott METGLAS lemezek mikrokeménység-értékei a vágott széltől való távolság függvényében [8]



■ 3. ábra. 2,5 W teljesítménnyel vágott METGLAS sorja maratott képe [9]



■ 4. ábra. 1,5 W teljesítménnyel vágott METGLAS sorja maratott képe [9]



■ 5. ábra. FINEMET minta olvadéksorja alakja (2500 x-os nagyítás) [8]

FINEMET olvadéksorja alakjában hasonlóság figyelhető meg. A kristályos részek (5. ábra), karakteres zónák látszódnak a FINEMET-nél mutatjuk be a SEM-vizsgálatot.

FINEMET és METGLAS mintán a lézervágás után megjelenő szemcsék nagysága az alapanyag felé csökken. Az olvadéksorja

és – 1,3 mm fókuszponteltolás. Rendkívül kedvező a csak 1200 HV<sub>0,02</sub> maximum keménységérték, illetve a 25 μm körüli hőhatásövezet.

Az eredményeket látva elgondolkodtunk egy olyan vágáson, aminél amennyire lehetséges, csökkentjük a teljesítményt úgy, hogy kisebb energiasűrűséget többször végigpásztázunk egyazon felületen (többszöri kontúrvágás). A 200–400 nanométeres hullámhossz (UV) tartományon működő, Nd:YAG-típusú, impulzusüzemű gravirlézer segítségével sikerült a METGLAS mintákat 2,5 W (30x85 μJ) és 1,5 W (50x50 μJ) teljesítménnyel elvágni. A vágások 30 kHz impulzus ismétlési frekvenciával és 100 mm/s vágási sebességgel mentek végbe.

A 2. ábrán látható, hogy a vágórészhez legközelebb a legnagyobbak a mikrokeménység-értékek. Ezután csökkent a keménység, míg 37,5 μm-nál már az alapkeménységhez közeli az érték (hőhatásövezet széle). A különbség a két teljesítményű vágás között az első lenyomatsor, aminek értékei alapján (1450 HV<sub>0,02</sub>) keményebb a 2,5 W-tal vágott lemez.

A különböző lézervágások során keletkezett sorja nagyságának, alakjának megállapításához metallográfiai vizsgálatot végeztünk. Folyamatos üzemű lézer esetén 60–80 μm átmérőjű sorját mértünk. Ekkora sorjaméret a gyártástechnológiában elfogadhatatlan. A 2,5 W teljesítményű vágás alkalmával 13 μm magasságú sorja jött létre (3. ábra), aminek alakja nem kör keresztmetszetű, hanem dárda alakú. Ennek oka maga a vágási technológia. A nagy energia impulzusonként részben párologást, részben olvadást, fröcskölést idézett elő az alapanyagban. Minden egyes pásztázáskor ugyanabban a kontúrban részben az olvadékból, részben a gőzfázisból történő lecsapódás sorját épített (maratott ábrák: 3. és 4. ábra). Az 1,5 W-os esetén sikerült az eddigi legkisebb, és így legkedvezőbb sorjaméretet (4. ábra) létrehozni, 6,6 μm nagysággal.

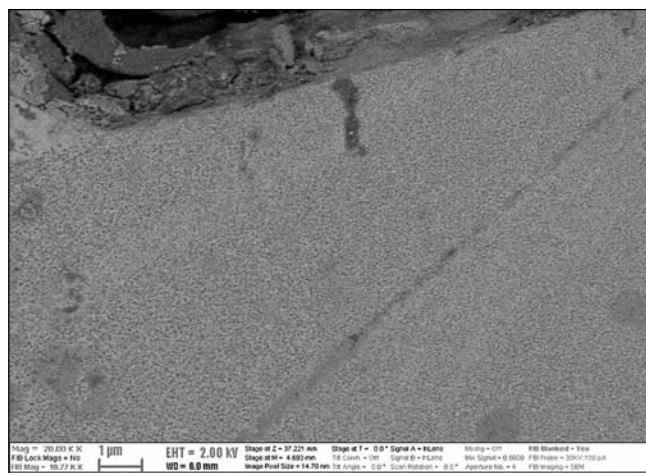
A következőkben a fémüveg szerkezetének direkt vizsgálatát (SEM) hajtottuk végre CO<sub>2</sub>-Ar-védőgázzal vágott mintára a nagyobb hőhatásövezet karakteresebb részeinek kimutathatósága miatt. Gravirlézervágás utáni direkt szerkezetvizsgálata jelenleg zajlik, a vizsgálat eredményére még várunk.

A korábbi röntgendiffrakciós felvételeken azonosított [9], a hőhatásövezetben feltételezhetően nanokristályos méretű, kristályos fázisokat szerettük volna nagyobb felbontású mikroszkóp alatt vizsgálni. Ezenkívül azért hasznos a direkt szerkezetvizsgálás, mert a SEM-vizsgálat lehetővé tette az indirekt szerkezetvizsgálat (mikrokeménység-mérés) ellenőrzését. Rátérve a SEM-mérésre, a METGLAS és

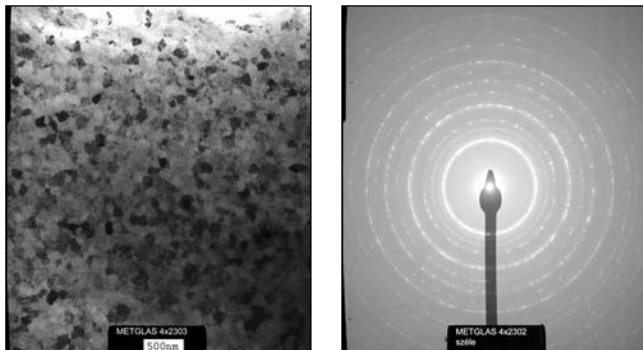
alsó szalag felső része egy hőkezelt szerkezet (nanokristályos szerkezet), míg a felső az olvadékból kristályosodott sorjaszerkezet (mikrokristályos szerkezet) figyelhető meg. Vizsgálatunk célja annak megállapítása volt, hogy az olvadéksorjától távolodva mikor tűnnek el a kristallitok. Eleinte az olvadéksorjától 26 μm, majd 82 μm, végül 106 μm távolságra néztük meg a kristallitok méretét (6. ábra).

Kerestük azt a távolságot, ahol a szemcsék kivehetetlenek voltak. Ez 130 μm távolság volt. Utóbbi azt jelenti, hogy ha a sorjafaj méretét, azaz 80 μm-t hozzáadunk, akkor 210 μm adódik. Vagyis a vágott éltől ekkora távolságra a kristályosodásból származó szemcsék eltűnnek, így onnantól teljesen amorf lesz az anyag. Körülbelül ekkora hőhatásövezetet becsültünk mikrokeménység-mérésnél FINEMET anyagra folyamatos üzemű lézervágás után. Ezzel sikerült validálni az indirekt szerkezetvizsgálatot direkt szerkezetvizsgálattal.

A transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatot (TEM) is a folyamatos üzemű, CO<sub>2</sub>-lézerral vágott fémüvegeken végeztük el. Itt is várjuk a gravirlézervágás utáni direkt szerkezetvizsgálat (TEM) eredményét. A keresztmetszeti vékonyítású minták transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatai nagyobb felbontásban mutatták meg a lézeres vágás okozta hőhatásövezet szerkezetét, sőt a határolt területű elektrondiffrakciós felvételek lehetővé teszik a kristályos fázisok meghatározását is. A vágott szél mellett a minta teljesen átkristályosodott. A szerkezet kétfázisú, 100–150 nm-es nagyobb kristallitokból áll (7. ábra bal oldala), de köztük a felvételeken jól megfigyelhető, jóval apróbb, 10 nm körüli kristallitok találhatóak. A kétféle fázis jelenlétét a



■ 6. ábra. Nanoméretű kristallitok a FINEMET mintában az olvadéksorjához közel (20000 x-es nagyítás) [8]



■ 7. ábra. A minta széléről, a vágott élénél készített elektronmikroszkópos és diffrakciós felvétel [9][10]

diffrakciós gyűrűk szerkezete is tükrözi (7. ábra jobb oldala). Az intenzívebb pöttyökből álló vonalak a nagyobb méretű kristallitoktól származnak, míg a halványabb folytonos vonalak az apróbb finomeloszlású fázistól. A 8. ábrán látható a vonalak helyének és intenzitásának a meghatározása. A vonalak elemzéséből kiderült, hogy a nagyobb méretű kristallitok  $\text{Fe}_3(\text{B},\text{Si})$ , míg a kisebbek  $\text{Fe}_2\text{B}$  fázisok.

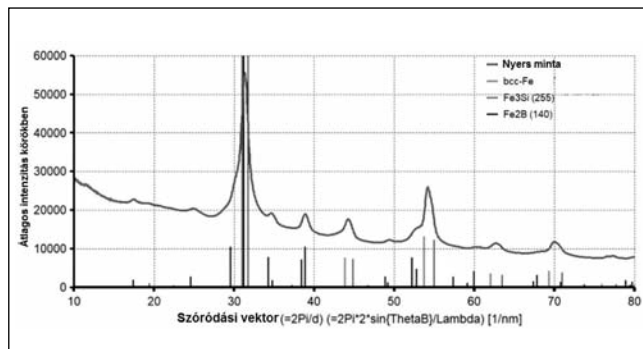
Eltávolodva a minta szélétől, 50  $\mu\text{m}$ -rel beljebb a hőhatásövezetben a minta még kristályos, de a kristallitok mérete egy nagyságrenddel kisebb, 10 nm körüli. 150  $\mu\text{m}$  távolságban méretük csupán 2-3 nm, az amorf maximumok mellett alig kivehetően még mindig látszik a néhány nm-es kristallitoktól származó halvány vonal a diffrakciós képen. Tehát a direkt szerkezetvizsgálat (SEM és TEM) jól visszaadja az indirekt szerkezetvizsgálatnál (mikrokeménységmérés) mért hőhatásövezet-távolságokat.

Nanokristályos lágymágneses anyagok ipari gyártásba való bevezetése a vágás által létrejött sorjanagyságtól és hőhatásövezettől függ, amit elkerülni vagy minimalizálni kell. Lézervágások közül az 1,5 W teljesítményű impulzusüzemű, gravírlézervágás adta a legkisebb sorját. Gazdaságosság szempontjából is feltehetően a gravírlézerrel történő vágás lenne költséghatékony a gyártó cégeknek. Célszerű tovább vizsgálni a jelenleg optimálisnak vélt vágást más szerkezetvizsgálati módszerekkel. Jelenleg a gravírlézervágásra vonatkozó SEM-, TEM-mérések és a globális mágneses vizsgálat folyamatban van.

### Következtetések

Vizsgálataink visszaigazolták azt a várakozást, hogy a lézeres kivágás hőhatása szerkezeti átalakulást, a lemez belseje felé fokozatosan csökkenő részleges kristályosodást fog okozni a vágási él mentén a mechanikai és mágneses tulajdonságok helyi megváltozásával együtt. Ezek a változások azonban a teljes anyagtömeg elenyésző részét érintik.

A YAG-lézervágásnál egy max. 40 mikronos körzetben duplájára nőhet a keménység (lásd 1. ábra). Mivel a  $H_c$  koercitív erő jól összefüggésbe hozható a szerkezeti inhomogenitások által okozott HV-változással (sajnos a  $H_c$ -re az 1. táblázatban nincs adat), a  $H_c$  pedig a hiszterézisvesztéssel, ezért a kivágott lamella egészét tekintve, nem jelenthet mérhető változást a mágneses tulajdonságokban, így az állórész + légrész + forgórész mágneses ellenállásában.



■ 8. ábra. A minta vágott szélénél készített elektrondiffrakciós felvétel intenzitáseloszlása [9]

A sorjaképződés azonban problémás! Emiatt a lamellák nem pakettálhatók hézagmentesen, töltőanyag alkalmazásával a 6  $\mu\text{m}$ -es sorja 33%-kal csökkentené a térkitöltést, ez nem elfogadható.

A továbbiakban vagy ki kell dolgozni valamilyen sorjátlanítást (a sorjátlanítás viszont akár bonyolultabb is lehet, mint a kivágás), vagy a lézeres kivágást kell úgy alakítani, hogy ne képződjön sorja. Más kivágási módszereket is megvizsgálunk.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatást az Új Széchenyi Terv keretében az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt támogatta, melynek címe Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában. A projekt befejezését az Európai Unió finanszírozza és az Európai Szociális Alap társfinanszírozza.

Megköszönöm *dr. Németh Sándor* fizikus professzor lektori munkáját, ami a jelen cikk elkészítéséhez elengedhetetlen volt.

### Irodalom

- [1] <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2015/junius/3683-villanymotorok-hatekonysaga-es-az-eu-direktivak>
- [2] <https://metglas.com/magnetic-material>
- [3] *Dr. Németh Sándor* fizikus közlése
- [4] <https://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm9-h.pdf>
- [5] <https://metglas.com/motors-amorphous-stators/>
- [6] <https://www.hitachi-metals.co.jp/e/press/pdf/2018/20181024en.pdf>
- [7] <https://metglas.com/wp-content/uploads/2017/07/Metglas-Efficiency-Improvement-of-Tapered-Pole-Amorphous-Magnetic-Material-Machine.pdf>
- [8] *Nagy Márton*: Nanokristályos lágymágneses anyagok bevezethetőségének vizsgálata gépjármű elektromotorok gyártásába. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, BME, 2019.
- [9] *Nagy Márton*: Hőhatásövezet direkt és indirekt szerkezetvizsgálata amorf lágymágneses anyagok lézeres vágása után – Tudományos Diákköri Konferencia, BME, 2019.
- [10] *K. Bán, M. Nagy, Zs. Fogarassy, A. Szabó*: Acta Physica Polonica A. (2019 publikálás alatt)