

Korszerű amorf üvegfém szalagok vágás technológiájának vizsgálata klasszikus metallográfiai- és egyedi mágneses mérések segítségével

Investigating the effects of cutting parameters of amorphous magnetic materials by classic metallographic and individual magnetic measurements

KOCSIS B.^{a,*}, KÓTI D.^b ÉS KOVÁCS G.^a

^aSzéchenyi István Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, 9026 Magyarország Győr Egyetem tér 1.

^bDunaújvárosi Egyetem, Gépészeti Tanszék, 2401 Magyarország Dunaújváros Táncsics Mihály utca 1.

Present study includes the development of shaped cutting technology of extremely thin amorphous magnetic materials. The results of classical metallographic measurements and individual magnetic measurements were based on the classification of cuts. The magnetic examinations were made on a measuring equipment which was developed for this purpose so that we could compare different technologies based on relevant values for end use. The main aim of our research is to develop an electric motor wherein a modern amorphous soft magnet forms the stator in a laminate design, as opposed to the previously rolled solutions. Our expectation is that due to the appropriate material selection, optimized geometry and laminate design, we get a more efficient, smaller volume electric motor than those currently available on the market.

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt fektetünk elektromos berendezéseink teljesítményének és hatékonyságának növelésére. Ennek egyik meghatározó fejlesztési irányvonala a korszerű lágymágneses anyagok használata a nagyteljesítményű elektromos berendezésekben [1]. Lágymágneses anyagoknak a kis koercivitással (jellemzően $H_c < 100$ [A/m]) rendelkező anyagokat tekintjük. Az amorf szerkezetű lágymágneses anyagok előnye, hogy kis koercivitásuk mellett vékony (0,025 mm) kialakításuknak köszönhetően kicsi a vasvesztésük, mindamelllett, hogy gyártási költségük alacsony [2]. A hagyományosan alkalmazott melegen vagy hidegen hengerlés helyett, úgynevezett gyorsított eljárással állítják elő. Ennek lényege, hogy az olvadt állapotban lévő ötvözetet egy belülről hűtött gyorsan forgó kerékre csepegtetik úgy, hogy a hűtés sebessége elérje a minimum 1000 °C/s-os értéket. Ennek következtében az anyagnak nincs ideje kikristályosodni, így a vasmolekulák amorf szerkezetben befagynak [3].

Számos kutatás foglalkozik az új állórész geometriák fejlesztésével, amely ezen vékony és rideg anyagok alakos vágási lehetőségeinek vizsgálatát vetíti előre. Jelenleg az iparban alkalmazott állórészeket tekercselés útján állítják elő, ahol ezeket a szalagokat hasítás révén hozzák a kívánt szélességre. Alakos vágásokhoz a legtöbb gyártó a vízugaras vágást említi, mivel ebben az esetben hőhatás nélkül tudjuk megmunkálni az anyagot, így az megőrzi amorf szerkezetét [4]. Jelen tanulmányban egy összehasonlító vizsgálatosorozatot mutatunk be, a lézersugaras és vízugaras vágások okozta hatásokról fémüveg szalagokon. A megmunkált alapanyag minden esetben a Metglas® 2605SA1 típusú Fe-Si-B alapú amorf lágymágnes volt.

2. Eljárás

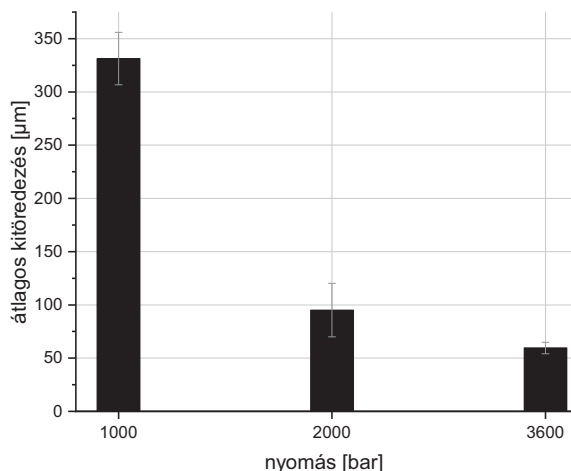
Előzetes szimulációk útján meghatározott állórész geometria megköveteli a pontos, CNC vezérelt alakos vágást.

Első technológia, amelyet vizsgáltunk az abrazív vízugaras vágás volt. A próbavágások során egy Flow IFB2 típusú kétdimenziós vágásokra alkalmas vízugaras berendezést használtunk.

Jelen esetben a vágott él minőségét a következő paraméterek befolyásolhatták: alkatrész megfelelő lefogatása, keverőcső hossza, kilépő vízugaras átmérője, fűvóka átmérője, vágófej távolsága a munkadarabtól, víz nyomása, abrazív homok tömegárama, előtolási sebesség, megfelelő vákuum, lyukasztás módja, valamint az abrazív homokszemcsék mérete. A fémüveg szalag lefogatására több módszert kipróbáltunk. PVC, valamint acél lemezek közé fogatva is végeztünk vágásokat, a tapasztalat az volt, hogy a PVC lemezek közé helyezett darabok vágott élei szebbek voltak. Próbálkoztunk vegyes lefogatásban is (alul acél, felül PVC és fordítva), de a PVC lefogatás bizonyult a legjobbnak. A keverőcső hosszának változtatása nem állt módunkban, minden esetben 76,2 mm hosszú keverőszárat alkalmaztunk. A kilépő vízugaras átmérőjét két különböző keverőcső segítségével 1,016 mm-re és 1,34 mm-re tudtuk beállítani. Az ekkora mértékű változtatás szignifikáns változást nem mutatott I réteg fémüveg szalag vágása során. A vágófej és munkadarab távolságának állítása manuálisan történt. Az összes vágási kísérlet során a gyártói ajánlásnak megfelelő kb. 2,5 mm-es beállítást alkalmaztuk. A szivattyúban felépülő és a vágás során optimálisnak bizonyult víznyomást a teljes tartományban 689,5 - 3861,1 bar között interpolációs

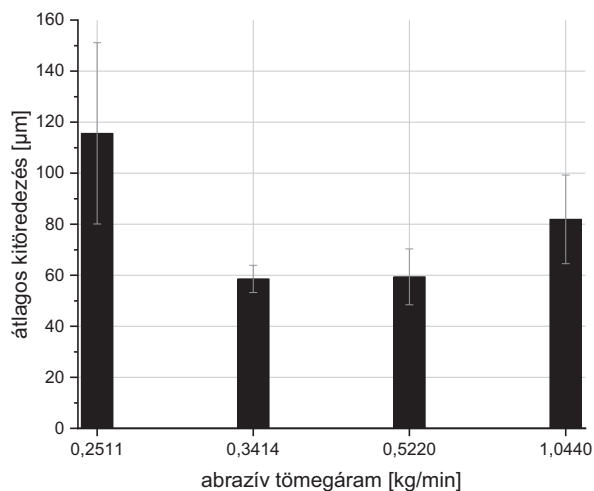
*Felelős szerző e-mail címe: kocsis.bence@sze.hu

közelítés útján határoztuk meg. A nyomás vágott él minőségére gyakorolt hatását optikai mikroszkópos mérésekkel ellenőriztük, melyet az 1. ábra szemléltet.

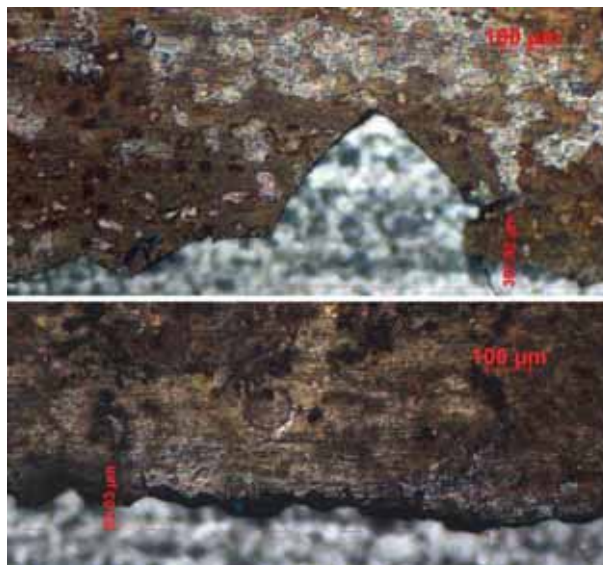


1. ábra Víz sugar nyomásváltozásának hatása a vágott él egyenetlenségére.

Az abrazív közeg tömegáramának hatásánál két dolgot kellett mérlegelni. Egy bizonyos mértékig növelve a tömegáramot egyenletesebb, határozottabb vágott él kaptunk, azonban ezek optikai és SEM (pásztázó elektronmikroszkóp) vizsgálata során kiderült, hogy sokkal több mikrorepedést, hibát tartalmaznak, mint a durván töredezt élű, kevesebb abrazívval vagy esetleg abrazív anyag nélkül vágott mintadarabok.

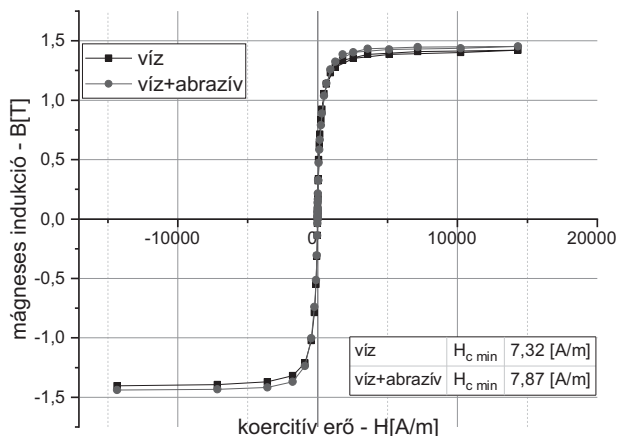


2. ábra Abrazív szemcsék tömegáramának hatása a vágott él egyenetlenségére.



3. ábra Abrazív nélkül (felső) és abrazívval (alsó) vágott üvegfém szalagok jellemző élszakaszainak optikai mikroszkópos felvételei 10-szeres nagyításban.

A mikrorepedések számának növekedésével egyre több folytonossági hiány, hiba keletkezik, amelyek közvetlen környezetében a mágneses tér kilép az anyagból, ezzel a vasmag mágneses energiája csökken. A mágneses mérések alapján a tisztán vízzel vágott minta telítési indukciója kis mértékben ugyan, de nagyobb lett, ami a fenti állításokat igazolja. Ennek szemléltetésére az 4. ábra szolgál.



4. ábra Abrazív anyaggal és anélkül kivágott 100 x 20 x 0,025 mm-es fémüveg mintadarabok mágneses histerézis görbéi.

Továbbá problémát jelent, hogy különböző feszültségállapotok jellemzik az anyagot, amelyek rontják az élettartamra vonatkozó tulajdonságait különösen, ha hőkezelésnek is alá akarjuk vetni. Következésképpen tehát a kevesebb abrazívval, gazdaságosabb úton előállított minták mágneses és élettartamra vonatkozó tulajdonságai is jobbak lettek annak ellenére, hogy nagyobb a vágott él egyenetlensége.



5. ábra Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel egy jellemző mikrorepedési képről, amorf fémüveg szalag vízszintes vágását követően.

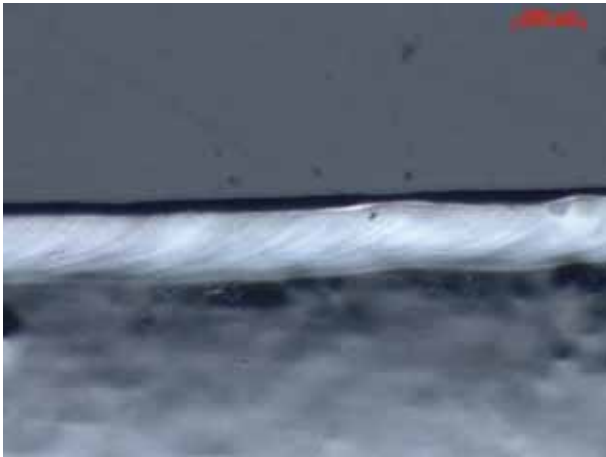
A következő vágási minőséget befolyásoló tényező az előtolási sebesség. Ennek a vizsgálatának az eredménye az előző bekezdésben leírtakból logikusan következik. Minél nagyobb előtolási sebességet alkalmaztunk, fajlagosan annál kevesebb abrazív szemcse jutott egy 1 mm-es szakasz kivágásához. Így tehát kevésbé roncsoltuk, stresszeltük az anyagot, csökkent a vágott él mentén a berepedeztettség. Ez szebb vágott élt és jobb mágneses tulajdonságokat eredményezett, mint a kisebb előtolási sebességgel készült darabok esetében. Abrazív homokszemcsék nélkül átlag 350-500 mm/min-es, abrazív anyag hozzáadásával akár 850-1000 mm/min-es előtolási sebességet is tudunk alkalmazni. Vágás során az úgynevezett "corner control" funkció be volt kapcsolva, amely a kontúr mentén az éles élváltások közvetlen közelében lelassított a vágófej előtolási sebességét. A vákuum megválasztásánál mindig az adott gyártói paraméterlistában meghatározott értéket alkalmaztuk. Ennek változtatása a próbavágások során nem mutatott jelentősebb hatást a vágott él minőségére. A lyukasztás módja is befolyásolhatja annak közvetlen közelében a vágott él minőségét. Ezt mi is tapasztaltuk, ugyanis a beszúrás helyén mindig rosszabb minőségű volt a vágott él. Minden esetben kontúron kívüli, álló helyzetű, nagynyomású lineáris lyukasztást alkalmaztunk. Az abrazív szemcsék méretének megfelelő megválasztásával lehet még tovább finomítani a vágás minőségét, azonban a kereskedelemben a vizsgálatok elvégzésekor csak egyféle szemcseméretű homok volt megtalálható. Az alkalmazott anyag egy ausztrál vöröshomok volt, melynek átlagos szemcsemérete 0,15-0,3 mm. Jelen esetben nincs relevanciája a sugárelhajlás és a vágott él kúposági vizsgálatának, mivel egy réteg vágásánál ez elhanyagolható, azonban a későbbi, többrétegű vágási vizsgálatoknál érdemes lesz ezeket is megvizsgálni.

A második technológia, amelyet a vágási kísérletek során kipróbáltunk, a lézeres anyagmegmunkálás volt. A lézersugár az anyagmegmunkálás egyik új és univerzális szerszámává

vált, ami a sokrétű felhasználásának köszönhető. A technológia lényege, hogy egy ún. aktív anyagot gerjesztve abból fotonok lépnek ki, amelyeket fókuszálva egy igen nagy teljesítménysűrűség érhető el. A lézersugár az anyag felületével találkozáva annak fajtájától és tulajdonságaitól függően elnyelődik, visszaverődik vagy áttersztődik. Esetünkben az anyag a sugárzás nagyrészt elnyeli, melynek következtében felhevül. A felület hőmérséklete meghaladhatja az anyag párolgási hőmérsékletét is. A lézersugárral koaxiálisan vezetett gázsugár segít eltávolítani a megolvadt, elpárolgott anyagot a vágási résből. Mindezek alkalmassá teszik ezt a technológiát arra, hogy különféle anyagokat hevítsen fel, olvasson meg, párologtasson el vagy plazma állapotba hozzon és e hatások eredményeként, anyagokat hőkezeljünk, feliratozzunk, hegesszünk vagy vágjunk vele. A lézersugár nagy energiasűrűsége és jó fókuszálhatósága révén térben és időben nagyon jól behatárolható energiabevitelt tesz lehetővé, ami a hagyományos eljárásokhoz viszonyítva jelentősen kisebb feszültségeket okoz, továbbá jó automatizáltsági foka révén pontos anyagmegmunkálásokat tudunk létrehozni. A lézeres vágási kísérletek során egy Oerlikon OPL 2000 típusú CO₂ lézert használtunk, folyamatos sugárzási üzemmódban, ahol a lézer teljesítménye 50 W volt. A vágást követően hagytuk a darabokat a szabad levegőn lehűlni. A kísérlet során 100 x 10 mm-es darabokat vágunk gyártási irányra merőlegesen és azzal megegyezően is.

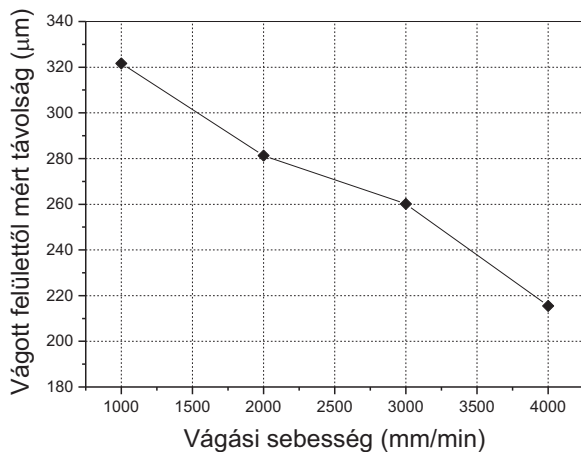
A vágott él minőségét a következő paraméterek befolyásolják: lézersugár fókuszálásának mértéke, amely szoftveresen állítható, vágási sebesség, lézerteljesítmény, védőgáz fajtája, s annak térfogatárama, fűvóka átmérője (kilépő lézersugár átmérőjét befolyásolja) és annak távolsága a munkadarabtól. A lézeres vágások esetében a vágott él minősítésére a szalag éle mentén kialakult hőhatásövezet szolgál információs értékkel. Ennek vizsgálatát mikrokeménység mérésével és metallográfiai eljárásokkal végeztük. A hőhatásövezetben az anyag az eljárás során felhevül, megolvad és az amorf szerkezetbe fagyott vas és szilícium molekulák újra képessé válnak, hogy felvegyenek egy rendezett, kristályos szerkezetet. Ezen kristályos szerkezet kialakulásával lokálisan romlanak az üvegfém szalag mágneses tulajdonságai. Következésképpen, minél kisebb hőhatásövezet alakul ki a vágás során, a végfelhasználás szempontjából annál jobb minőségű mintadarabot kapunk.

A lézersugár fókuszálásának vizsgálata jelenleg is folyik. Ebben a tanulmányban taglalt vizsgálatok során a fókuszpont az üvegfém lemez felszínére volt beállítva. Vélhetően, ha a lemez síkja alá fókuszálunk a lézerral, akkor csökkenthető a vágott élnél a lokális energiabevitel, nagyobb felületen oszlik el a lézersugár teljesítménye, vagyis csökkenhet a hőhatásövezet szélessége. A vágási sebességet a gép korlátainak megfelelően 1000 - 4000 mm/min között változtattuk. A szakirodalom szerint, minél nagyobb vágási sebességet alkalmazunk, annál kisebb lesz a fajlagos hőbevitel és ezáltal a hőhatásövezet szélessége is. Ennek helytállóságát a kísérletek során méréseink is alátámasztják.



6.ábra CO₂ lézeres vágás mikroszkópos felvétele. Vágási sebesség 4000 mm/min, védőgáz típusa argon, áramlási sebessége 30 l/min.

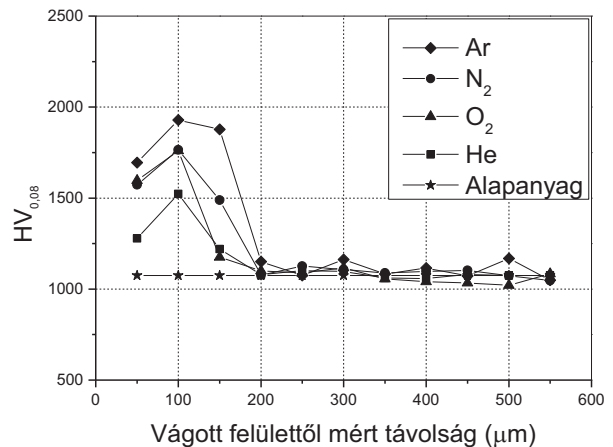
A vágások során a lézer kimeneti teljesítménye konstans 50 W volt, a védőgáz Ar volt, melynek egy állandó gázáramlási sebességet állítottunk be. Az eredmények azt mutatják, hogy a vágási sebesség növelése drasztikus mértékben csökkenti a hőérzékeny terület szélességét. Ezt szemlélteti a 7. ábra.



7.ábra CO₂ lézeres vágási sebesség hatásának vizsgálata a hőhatásövezet szélességére. Az alkalmazott védőgáz típusa argon, áramlási sebessége 30 l/min.

A lézer teljesítményét 6000 - 50 W között tudtuk állítani. A korábban leírtak alapján itt is igaz, hogy minél kisebb a lokális energiabevitel a vágás környezetében, annál kisebb lesz a hőhatásövezet és a leolvadási sorja is. A rendelkezésünkre álló berendezés minimális lézerteljesítményét alkalmazva kaptuk a legjobb minőségű mintadarabokat. A jövőben egy precíziós berendezésen elvégezzük a még kisebb lézerteljesítményű vágásokat, valamint egy szállézeres gépen vizsgáljuk az impulzus üzemi vágások minőségét is. A vágások során Ar, N₂, O₂, He védőgázokat használtunk. A védőgáz típusának és áramlási sebességének hatásánál a várakozásainkkal ellentétes eredményt kaptunk a kiértékelés során. A különböző

gázatmoszférák típusának nincs jelentős hatása a hőhatásövezet szélességére, ám a mikrokeménység csúcsok nagyságára igen. A kapott eredmények azt tükrözik, hogy a védőgáz hővezetőképessége jelentős hatással van a kristályosodás mértékére, 8. ábra.

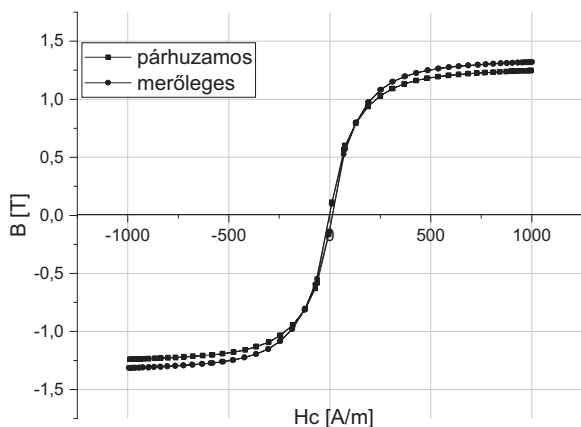


8.ábra CO₂ lézeres vágások során vizsgált védőgáz típusok hőhatásövezetre gyakorolt hatásának vizsgálata.

A gázatmoszféra különböző áramlási sebességeinek beállításánál is hasonló eredményeket kaptunk. A hőhatásövezet szélességére nem, de a keménységértékek nagyságára befolyással van az áramlási sebesség. Ennek magyarázata egyszerűen a nagyobb hőelvonó képességre vezethető vissza. A fúvóka átmérőjének a vágásra gyakorolt hatását nem állt módunkban vizsgálni. A fúvóka távolsága konstans 2 mm volt a munkadarabtól.

3. Összefoglalás

Az amorf szerkezetű lágymágnes szalagból előre definiált méretű (100 x 10 mm; 100 x 20 mm) négyzetes próbatesteket munkáltunk ki. Ezek megfelelő összehasonlítási alapul szolgáltak a különböző megmunkálási technológiákhoz. Az összehasonlítás alapjául a vágott él metallográfiai és mikrokeménység mérés eredményei szolgáltak, amelyeket később összevetve az egyes minták mért mágneses hiszterézis görbéivel, különböző korrelációkat állapítottunk meg. Mivel a kutatás részeként megtervezett elektromotor álló részének geometriája megkövetelte, vizsgáltuk a szalag mágneses tulajdonságainak irányfüggőségét is. Ahogy arra következtetni lehetett, az amorf szerkezet miatt nem mutatott anizotropikus tulajdonságokat a gyártási irányra merőlegesen, valamint azzal megegyezően kivágott mintadarabok.



9. ábra Üvegfém szalag irányfüggőségének mágneses vizsgálata.

Vízugaras vágás során készített mintadarabok optikai mikroszkópos felvételei alapján a következő összefüggéseket állapítottuk meg. A gyártói ajánlásban szereplő ~2,5 mm-es fúvóka-mintadarab távolság megfelelő, a nyomás csökkentésével romlik a vágott él minősége, nem lesz határozott vágott/ridegen tört felülete az élnek, növekszik a harmadik dimenzióban megjelenő sorja mérete. A vágások során a leoptimálisabb nyomásértéknek a 3600 bar jött ki. Tesztelt nyomástartomány 689,5 - 3861,1 bar volt. Az abrazív anyag tömegárama és a fúvóka előtolási sebessége között egyenesarányos kapcsolat van. Ha növelem a tömegáramot, növelnem kell az előtolási sebességet is. Esetünkben az átlagos 850-1000 mm/min-es előtolási sebességhez 0,3414 kg/min tömegáramú abrazív anyag bizonyult a leoptimálisabbnak. A fúvóka átmérőjének változtatásában túl nagy mozgásterünk nem volt, de a kisebb átmérőjű fej némiképp jobb élminőséget garantál. Ennek további vizsgálata indokolt. Drasztikus minőségjavulás várható továbbá az abrazív homokszemcse méretének csökkentésével is, amelyet a jövőben vizsgálni fogunk.

Az egyes mintadarabok vágás utáni mikrokeménységének vizsgálatánál azt vártuk, hogy jelentős különbséget nem tapasztalunk az éltől a mintadarab közepe felé haladva, mivel ez a technológia hőhatás nélküli eljárás, vagyis a szövetszerkezetet nem változtatja meg. Várakozásaink beigazolódtak, élmenti felkeményedés nem volt tapasztalható, minimális véletlenszerű keménységváltozás figyelhető meg, amely az amorf szövetszerkezetnek, a mikrorepedéseknek és a rendkívül vékony mintadarab miatti mérési bizonytalanságnak tudható be.

A mágneses mérések alapján elmondható, hogy a legjobb tulajdonsággal a tisztán vízzel vágott mintadarab rendelkezik, ám nem sokkal marad el tőle az általunk leoptimálisabbnak minősített technológiával vágott darab. A jövőben érdemes lesz mérlegelni költséghatékonysági szempontból, hogy ugyan a koercitív terükben ~0,5 A/m volt a különbség a tisztán vízzel vágott darab javára, de abrazív homokszemcsék hozzáadásával kétszeres előtolási sebességet tudunk alkalmazni és akár több réteg vágására is alkalmas lehet.

A CO₂ lézeres vágások kiértékelésére is ugyan azokat a vizsgálati módszereket alkalmaztuk, mint a vízugaras minták esetében. Konklúzióként megállapítható, hogy minél kisebb energiabevittel kivitelezhető a vágás, annál kisebb hőhatásövezet alakul ki a vágott él mentén. A fókuszávolság és a lézerteljesítmény változtatásával tovább csökkenthető az energiasűrűség a vágásnál, így ezek vizsgálatát a jövőben elvégezzük. A megfelelő védőgázt a hőelvonó képesség alapján érdemes megválasztani, amivel jelentősen nem csökkenthető a hőhatásövezet szélessége, de a fázisátalakulás mértéke igen. Az előtolási sebesség mértékét növelve szintén csökkenteni tudtuk a vágás során bevitt energiamentységet, amivel viszont már drasztikus csökkenést értünk el az átalakult szövetszerkezet szélességében. A mágneses mérések alapján indokoltnak találjuk a szállézeres valamint az impulzus üzemű lézeres vágások vizsgálatát is. Amennyiben tovább tudjuk csökkenteni a vágáshoz szükséges energiabevitelt, jó eséllyel megközelíthetjük vagy akár túlszárnyalhatjuk a vízugaras vágással készült minták mágneses tulajdonságait.

Köszönetnyilvánítás

Jelen dolgozat megvalósulásában segítségünkre voltak a Széchenyi István Egyetem munkatársai Dr. Zsoldos Ibolya, Dr. Csizmazia Ferencné, Dr. Kuczmann Miklós, a Dunaújvárosi Egyetemről, Dr. Szabó Attila, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemről Prof. Dr. Mészáros István és Dr. Lovas Antal, a Kassai Műszaki Egyetem munkatársa Dr. Novák László, akiknek ezúton szeretnénk megköszönni közreműködésüket. Köszönetünket fejezzük ki az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 és az EFOP-3.6.1-16-2016-00017 Nemzetköziesítés, oktatói, kutatói és hallgatói utánpótlás megteremtése, a tudás és technológia transzfer fejlesztése, mint az intelligens szakosodás eszközei a Széchenyi István Egyetemen pályázatok támogatásáért.

Referenciák

- [1] S. Derlecki Z. Kusmierek D. Maria J. Szulakowski "Magnetic properties of amorphous materials used as corps of electric machines" *Przeglad Elektrotechniczny (Elect. Rev.)* vol. 88 no. 12a pp. 10-13 2012.
- [2] A. Krings, M. Cossale, A. Tenconi, J. Soulard, A. Cavagnino, A. Boglietti, *Magnetic Materials Used in Electrical Machines*, IEEE Industry Applications Magazine november/december 2017.
- [3] R. Hilzinger W. Rodewald *Magnetic Materials Fundamentals Products Properties Applications* Erlangen Germany:Publicis 2013.
- [4] A. Schoppa, H. Louis, F. Pude, Ch. von Rad: Influence of abrasive waterjet cutting on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254–255 (2003) 370–372.