

MÁJLINGER KORNÉL – SZABÓ PÉTER JÁNOS

## Lemezgrafitos öntöttvas kezelése Yb-szállézerrel

*Az egyre szigorodó európai károsanyag-kibocsátási normák betartása érdekében az egyik nagy európai gépjárműgyártó cég belsőégésű motorjainak hengerfuratán lézersugaras kezelést végez. Munkánkban lemezgrafitos öntöttvasból készült motorok henger-futófelületének lézerkezelt rétegét vizsgáltuk nanoindenteres keménységmérővel és Ga-ionforrással felszerelt pásztázó elektronmikroszkóppal. Cikkünkben Yb-szállézerrel kezelt mintasorozatot vizsgáltunk, melynek felületi rétege megolvadt és ultrafinom szövetszerkezetű lett.*

### 1. Bevezetés

A környezeti és károsanyag-kibocsátási normák világszerte és egyben Európában is egyre szigorodnak. Mindamelllett az üzemanyagárok folyamatos növekedésével is számolni kell. Ezért többek között az autómotorgyártóknak egyre jobb hatásfokú és környezetbarát motorok gyártására kell törekedniük. Az egyre dráguló üzemanyagárok is arra sarkallnak, hogy a gyártók jobb hatásfokú motorokat gyártsanak, amelyeknek növekvő teljesítmény mellett sem növekedhet a fogyasztása. Természetesen elvárt az is, hogy a motoroknak hosszú legyen az élettartama [1]. A fogyasztáscsökkentés és a teljesítménynövelés az Ottó- és dízelmotoroknál egyaránt nagyobb égéstéri nyomással jár, ami megnöveli az egymással érintkező súrlódó felületek tribológiai igénybevételét, esetünkben a dugattyúgyűrű és a hengerfal rendszerét [1].

Lézersugaras kezeléseket a felületötvöztől a lézersugaras edzésig [2-5] széles körben használnak súrlódó alkatrészek felületi tulajdonságai-

nak változtatására, javítására. Ilyen lézersugaras kezelésekre egyre nagyobb teret nyerne az autóiparban is. A fékdoboktól a motoralkatrészekig [6-10] számos autóalkatrész gyártanak lézersugaras felületkezeléssel, amelynek a célja az alapanyag felületi és felületközei tulajdonságainak megváltoztatása.

A motorblokk henger-futófelülete mechanikai tulajdonságainak javítása érdekében lehetséges speciális mechanikai kezeléseket [11] végezni, kémiai bevonatolást [12-14] alkalmazni, lézeres felületstruktúrált [15] alkalmazni, vagy – ahogy azt egy nagy európai gépjárműgyártó teszi – speciális lézersugaras kezelést végezni. Ennek a jelenleg V-elrendezésű öntöttvas motorblokkokon alkalmazott lézersugaras kezelésnek a hatására a futófelület keményebb és kopásállóbb lesz. Továbbá, a perlitese mátrixba ágyazott inhomogén grafitkiválások következtében olajtartó üregek alakulnak ki a felületen. Ez a kezelés növelt motorteljesítmény mellett is az olajfogyasztás csökkenéséhez vezetett [1, 16].

### 2. Kísérleti és vizsgálati módszerek

#### 2.1. A lézersugaras kezelés

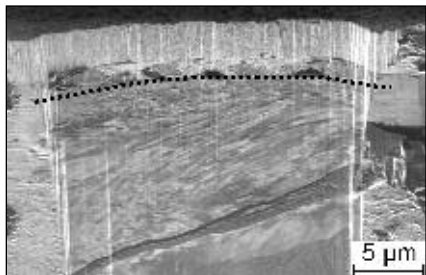
A kísérletekre használt motorblokkok anyaga GJL-250 jelű lemezgrafitos öntöttvas volt. A mechanikus furatmegmunkálási lépések (marás, majd utolsó lépésként hónolás) során a szerszámok egyes grafitlemezeket betemettek vékony ferritréteggel, míg mások szabadon maradtak. A lézersugaras kezelés által gyújtott fémgőzplazma hatására ezen grafitlemezek egy része elpárolgott, illetve kiszabadult a ferritréteg alól, így alakítva ki egy nem kommunikáló olajtartó rendszert a henger falán [1], miközben a felület megolvadt.

A sorozatgyártásban jelenleg Xe-CI excimer lézert használnak. Ez egy UV hullámhossz tartományba (308 nm) tartozó lézer 300 Hz-es ismétlési frekvenciával. Az eljárást az EP 1 738 859 A1 szabadalom védi. Kezelés során a felületet négyzetes fojtattal meghatározott raszter szerint levilágítják.

További kísérletek folynak alternatív lézerforrások keresésére, mivel az excimer lézereknek nagyobb a karbantartás- és szervizigényük, mint a szilárdtest-lézereké, ráadásul nem elhanyagolható a helyfoglalásuk sem. További hátránya az eddig alkalmazott lézereknek, hogy az egész motorblokkot kell a lézer optikai kicsatolása körül forgatni a kezelés során, ami jelentősen csökkenti a lézerberendezés kihasználtságát.

A szállézeres kompakt méretük és jó hatásfokuk következtében egyre nagyobb teret nyerne, ezért mi is egy különböző energiasűrűséggel elkészített Yb-szállézerrel kezelt mintasorozatot vizsgáltunk. A minták egy üzemi körülményeket szimuláló teszt-

*Szabó Péter János életrajza a Kohászat 2011/2. Vaskohászat rovatban található. Májlínger Kornél okleveles gépészmérnök, nemzetközi hegesztőmérnök, a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének egyetemi tanársegédje. 2011-ben PhD-fokozatot szerzett öntöttvas motorblokkok futófelületének lézersugaras kezelése témából.*



■ 1. ábra. A FIB vágás helyén, a pontozott vonal felett a Ni-réteg látható

padon készültek, ami különböző lézerforrások becsatolására alkalmas. A minták anyaga GJL-250 jelű lemezgrafitos öntöttvas volt. Az elkészítés paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. A különböző energiasűrűséggel kezelt részek egyazon motorblokk különböző furataiban készültek, 2×2 kezelési stratégiával. Ez azt jelenti, hogy az egyes területeket az optikai tubus bevezetések és a furatból való kiemelések is kétszeres átfedéssel kezeltük lézersugárral. A lézerfolt 0,9×0,9 mm-es négyzet volt.

## 2.2. Fókuszált ionsugaras vizsgálatok

A fókuszált ionsugaras vizsgálatok (Focused Ion Beam, FIB) LEO Gemini cross beam pásztázó elektronmikroszkóppal (Scanning Electron Microscope, SEM) készültek, ez egy SEM/FIB kombinációja. A felvételek olyan tartományokról készültek, amelyek legalább 10 μm-re voltak a lemezekről, hogy elkerüljük a hatásukat. Korábbi munkáinkban [17–20] Ga ionsugárral lépcsőzetes üreget munkáltunk a minták felületébe, és annak merőleges faláról készítettünk felvételeket csökkentett ionsugárárammal. Ezt az eljárást annyiban leegyszerűsítettük, hogy a FIB vágást egy polírozott keresztcsiszolati minta falán végeztük, először nikkellel bevont mintán (1. ábra), de a vágás valószínűleg a Ni-réteg miatt eléggé hullámos lett (curtain effect), ezért a továbbiakban a nikkelezést elvetettük. Mivel úgy ítéltük meg, hogy a minta élének roncsolódása elhanyagolható, a Pt-réteg felvitelétől is eltekintettünk.

A FIB műveletekhez használt főbb paramétereiket a 2. táblázat tartalmazza. Az a jelű mintánál a mintaelőkészítésből fakadóan a „durva vágás” műveleti lépésnél az ionsugár árama

1. táblázat. Az Yb-szállézerrel végzett lézersugaras kezelés főbb paramétereit

Minta	Hullámhossz (nm)	Impulzushossz (ns)	Impulzusfrekvencia (Hz)	Energiasűrűség (mJ/mm <sup>2</sup> )	Teljesítménysűrűség (mJ/(mm <sup>2</sup> ns))
a	1065	140	12500	19,2	0,1369
b	1065	140	12500	22,6	0,1616
c	1065	140	12500	26,7	0,1905
d	1065	140	12500	30,4	0,2173

2 nA volt. A megmunkált felület és az ionsugár által bezárt szög felvételkészítéskor 54° volt. Az átlagos szemcseméret és a lézersugárral megolvasztott rétegvastagságok meghatározása egy összeillesztett ionsugaras képen történt. Ez a kép több egymás melletti területről készült ionsugaras kép összeillesztve, így a vizsgált terület kb. 20 × 7 μm volt (20 μm vízszintesen és 7 μm függőlegesen). A futófelületre merőleges sík metszeten vizsgáltuk a szemcseszerkezetet, és azt találtuk, hogy a szemcsék kiterjedése mindkét irányban közel azonos. Mivel a legnagyobb hőelvonás iránya merőleges a felületre, és ebben az irányban is azonos mérettartományban mozogtak a szemcsék befoglaló méretei, mint keresztirányban, fizikailag nem indokolt, hogy a szemcseméretet a harmadik irányban jelentősen eltérjenek. Ezek alapján a szemcsék poligonálisnak tekinthetők a felületi megolvadt rétegben, ezért egy egyszerű szemcseméret-meghatározást választottunk. Az összeillesztett ionsugaras kép lézerkezelt rétegébe három vonalat húztunk (szemcsehatártól szemcsehatárig) és megszámoztuk az elmetszett szemcséket, majd az így kapott szemcseméret-értékeket átlagoltuk.

## 2.3. Felületi SEM vizsgálatok

A henger futófelületéről és csiszolatáról további felvételeket készítettünk egy Philips XL 30 típusú SEM-mel.

Mivel a szabad grafitüregek olajtartó térfogatként funkcionálnak, jelentősen befolyásolják a súrlódási viszonyokat. Ennek meghatározására, hogy az alapanyagban megtalálható grafitlemezek helyén kialakult üregek hány százaléka befolyásolja

a súrlódási viszonyokat, bevezettük a GK szabadgrafitüreg-arány mutatószámot. Ezt a mutatószámot a következő módon adtuk meg:  $GK = (G_{csiszolat}/G_{felület}) \times 100$  (%), ahol  $G_{csiszolat}$  a futófelülettel párhuzamos csiszolaton (közel a felületi mérés helyéhez) mért grafit területaránya,  $G_{felület}$  pedig a felületen mért grafit területaránya. A grafitlemezek és az üregek területének mérését visszászórtelektron-detektorral készített SEM felvételeken határoztuk meg, ahol a sötét pixelek felelnek meg a grafitnak, illetve az üregeknek [20]. Mivel egy felvételenyi területet nem találtunk elegendőnek, a kiértékelést képelemző szoftverrel 20 összeillesztett képen végeztük, így a vizsgált terület 1900×1600 μm-es volt. A GK mérőszám csak összehasonlításra szolgál, de azonos anyagra jól jellemzi a mechanikus előmunkálás és az azt követő lézersugaras kezelés együttes hatékonyságát.

## 2.4. Nanoindentációs keménység-mérések

Mivel a lézerkezelt réteg a hagyományos keménységmérési és mikro-keménység-mérési eljárások behatolási mélységéhez képest is igen vékony, a réteg keménységének meghatározását nanoindenterrel végeztük. A mérések az ELTE Anyagfizika Tanszékén Vickers-gyémánttal szerelt UMIS nanoindenterrel történtek. A terhelőerő 5 mN volt. A mérési pontokat egymástól 20 μm távolságra 20×20-as mérési raszterben rendeztük el. A 400 mérési pontot a követke-

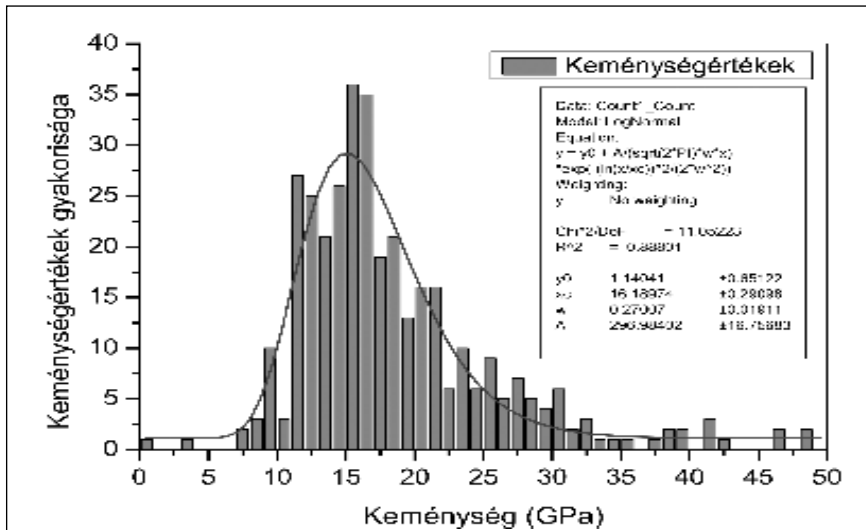
2. táblázat. A FIB vizsgálatokhoz használt főbb paraméterek

FIB műveleti lépés	Gyorsítófeszültség	Ionsugáráram
„Durva vágás”	30 kV	1 nA
„Finom vágás”	30 kV	200 pA
Ionsugaras maratás	30 kV	50 pA
Ionsugaras képfelvétel	30 kV	20 pA

ző kritériumok alapján szelektáltuk:

- maximális behatolási mélység 200 nm (átlagos behatolási mélység <150 nm);
  - nullpont hiba <10 nm;
  - visszaállási hiba <10 nm,
- majd a megmaradt mérési pontokat (legalább 250 érték) statisztikai módszerrel értékeltük ki. Adott terhelésenként a keménységértékeken Origin-programban végeztünk gyakoriságvizsgálatot, majd a kapott értékeket oszlopdiaqramban ábráztuk (2. ábra). Ezután megkerestük az erre a diagramra legjobban illeszkedő függvényt.

A felület keménységének meghatározására a lognormál-eloszlás függvény adta a legjobb illesztést. Az alapanyag keménységének meghatározásához – a felületi deformált réteg kialakulásának elkerülése érdekében – a csiszolaton visszaszórt elektron diffrakcióhoz szokásos mintaelőkészítést alkalmaztuk. A mintát beágyasztuk, és mint egy hétköznapi öntöttvas mintát, metallográfiai vizsgálatra előkészítettük [21]. Az 1 µm-es szemcseméretű Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> szuszpenziós polírozás után 10 másodpercig 2%-os nitál marószemben marattuk, majd a mintát automata polírozógépen tovább políroztuk 0,05 µm szemcseméretű SiO<sub>2</sub> szuszpenzióval. A gép beállításai: 5 N erő, 300 1/perc fordulatszám mellett 35 percig.



■ 2. ábra. A nanoindentérral mért felületkeménység-értékek gyakoriságának histogramja és az értékekre illesztett log-normal függvény

### 2.5. Mikrokeménység-mérések

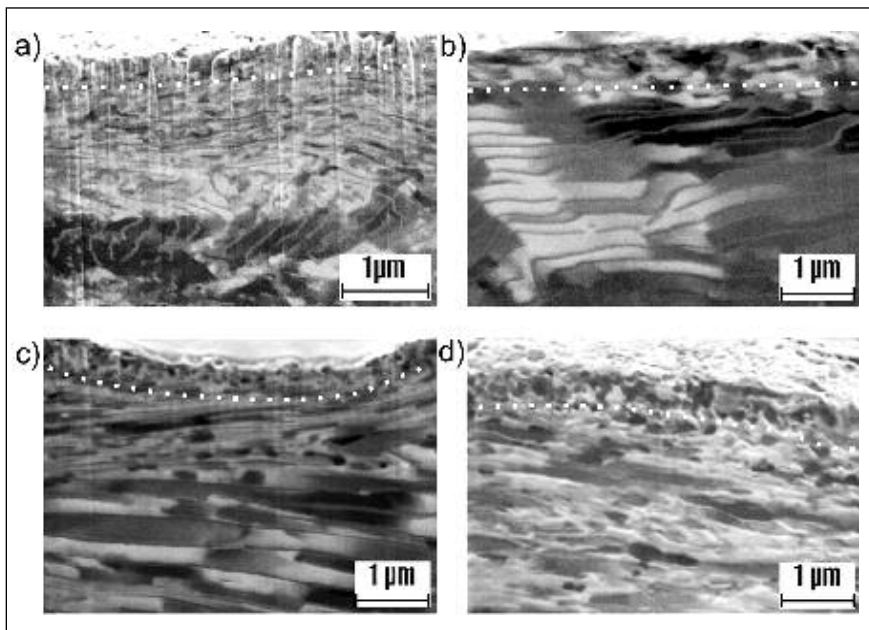
A mikrokeménység-mérések Buehler 1011 mikrokeménység-mérővel készültek, Vickers-piramis hegygel. A terhelés 1000, 500, 300, 200, 100, 50, 25 és 10 gramm volt. Minden terhelés mellett legalább 15 mérési pontot vettünk fel a felületen, és a nanoindenteres mérésnél leírt módszerrel értékeltük ki. A mérési eredményekre a Gauss-függvény adta a legjobb illesztést. A mérési pontokat úgy vettük fel, hogy elkerüljük a grafitkiválásokat és azok hatását. A 10 g terhelés mellett felvett lenyomatokat SEM felvételeken mértük meg.

### 3. Vizsgálati eredmények és értékelésük

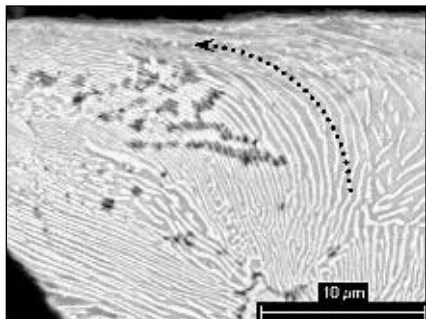
#### 3.1. Fókuszált ionsugaras vizsgálatok

A FIB keresztmetszeti csiszolat felvételein (3. ábra) jól látható, hogy lézersugaras kezelés hatására a felület megolvadt. Ahogy említettük, az Y1 minta az első ionsugaras lépésben („durva vágás”) 2 nA árammal készült, és láthatóan hullámosodott [22, 23], amit a további lépésekben sem sikerült eltávolítani. A jó felületi minőség elérése érdekében a többi minta csökkentett ionárammal készült. A megolvasztott réteg vastagságát képelemző szoftverrel FIB felvételeken is meghatároztuk (RFIB), továbbá megmértük még SEM felvételeken hagyományosan elkészített metszeti metallográfiai mintákon [21] is. A megolvasztott rétegvastagságok értékeit a 3. táblázat tartalmazza.

Ahogy látható, a megolvadt réteg vastagsága, a már hűlés után is hullámos felület miatt, tág határok között változik (0,5–2,1 µm), de kijelenthető, hogy néhány mérési hely kivételével körülbelül 1 µm vastag. Az átlagos szemcseméretet, amelyeket a FIB felvételek alapján határoztak meg, szintén a 3. táblázatban láthatók. Az átlagos szemcseméret az összes mintán 150–240 nm között volt, tehát az anyagrészt ultrafinom szemcseméretűnek tekinthető. A megolvadt felület ultrafinom szerkezete valószínűleg az igen nagy hűlési gradiens okozta nagy hűlési se-



■ 3. ábra. FIB felvételek a motorblokkok keresztmetszeti részéről. A lézersugarasan megolvasztott rész a pontozott vonal felett látható az a)–d) mintákon



■ 4. ábra. SEM-felvétel a futófelület csiszolatáról és a hónólószerszám forgásának irányába görbült cementtílemezek

besség következménye. A hőmérsékleti viszonyok vizsgálata céljából végelelemes szimulációt végeztünk, amely szerint a hűlési sebesség  $10^6$ - $10^8$  K/s között változhatott [24, 25].

Jól ismert, hogy szilárduláskor a kritikus csíraméret fordítottan arányos a túlhűtéssel:  $r = 2\gamma T_E / L \Delta T$ , ahol  $r$  a kritikus csíraméret sugara,  $\gamma$  – a

mag kritikus felületi energiája,  $T_E$  az egyensúlyi hőmérséklet (olvadáspont),  $L$  a látens hő szilárduláskor és  $\Delta T$  a túlhűtés. Esetünkben a túlhűtés igen nagy, mivel a megolvadt rész térfogata igen kicsi a környező szobahőmérsékletű tömbanyaghoz (motorblokk) képest. Ezért a kritikus csíraméret igen kicsi, tehát egyszerre sok csíra indul növekedésnek, a végleges szemcseméret kicsi lesz.

Ez alatt a réteg alatt az alapanyag-nak jóval nagyobb a szemcsemérete. Ezek a szemcsék enyhén görbültek a gépi furatmegmunkálási lépések (marás, hónólás) irányában (4. ábra).

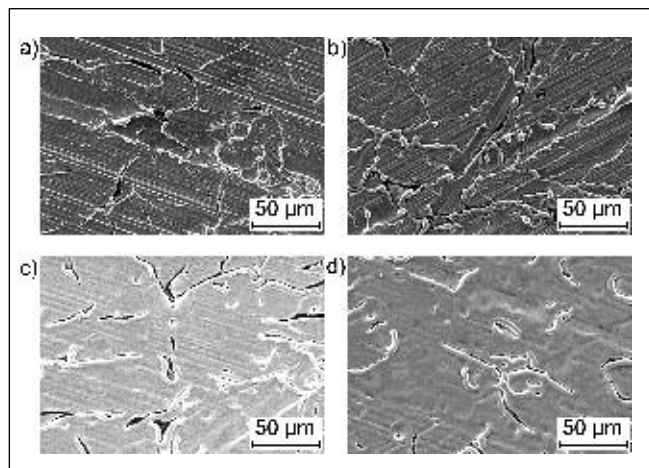
### 3.2. Felületi SEM-vizsgálatok

A felületek morfológiája is nagy mértékben befolyásolja az alkatrészek közötti súrlódási tulajdonságokat. A felületi morfológia vizsgálatára SEM-

ábra) jól látható, az *a* és *b* minta felülete nem egyenletesen olvadt meg, a grafitlemezek felett elkenődött fémréteg megolvadt és a felületi feszültség összehúzta a grafitlemezek mellé. Ezeknél a mintáknál még a hónólási karcok nyomai is láthatók. Ezek a jelenségek nem kívánatosak, mivel a hónólási karcokban el tud szökni az olaj a dugattyúgyűrű mellett, illetve a grafitlemezek melletti „kitüremkedések” a dugattyúgyűrűvel való érintkezéskor lekopnak és motorkárosodáshoz vezethetnek. A *c* és *d* mintáknál a nagyobb energiasűrűséggel kezelt, sokkal egyenletesebb, simább felület már alkalmazható motorban.

A képértékelő szoftverrel SEM-képeken meghatározott GK szabadgrafitüreg-arány mutatószámának változását a lézer teljesítménysűrűségének függvényében a 6. ábra mutatja.

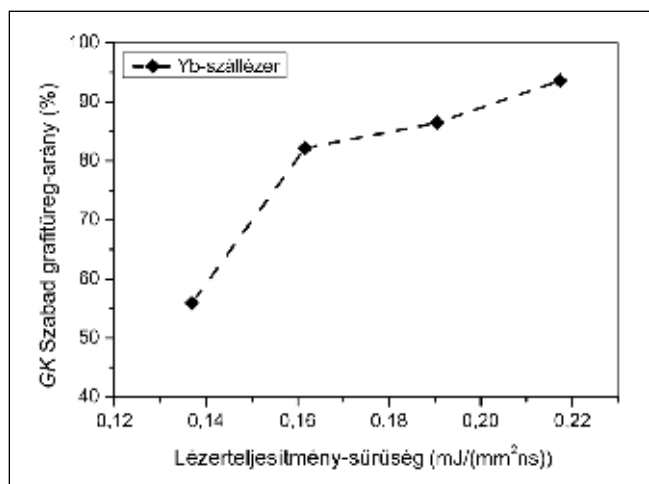
Ahogy az ábrán látható, a GK értéke a lézerteljesítmény-sűrűséggel monoton növekszik. Ez várható volt, hiszen a nagyobb lézerenergia-sűrűség vastagabb fémréteg elpárologtatására képes, illetve vastagabb réteg-felvételeken (5.



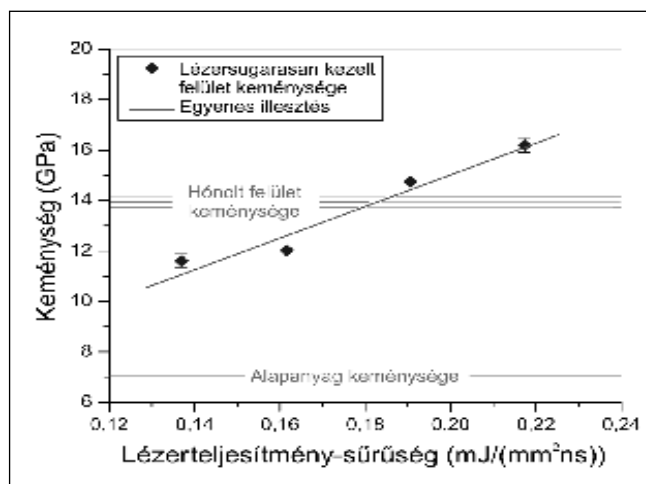
■ 5. ábra. SEM-felvétel a lézersugarasan kezelt felületről a)–d) minták

3. táblázat. A lézersugarasan megolvasztott réteg vastagsága FIB ( $R_{FIB}$ ) és SEM ( $R_{SEM}$ ) felvételeken mérve, illetve a FIB ( $d_{FIB}$ ) felvételeken mért szemcseméret

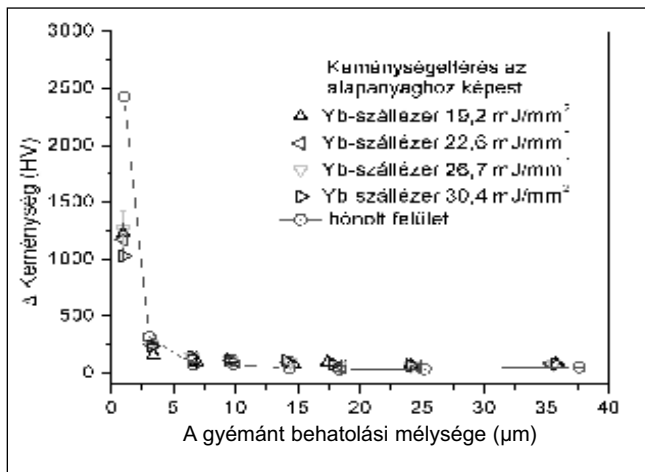
Minta	Megolvadt rétegvastagság		Szemcseméret
	$R_{FIB}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{SEM}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{FIB}$ (nm)
a	0,90 – 1,04	0,52 – 1,35	243
b	0,41 – 0,81	0,55 – 2,07	151
c	0,73 – 0,97	0,56 – 1,57	214
d	0,93 – 1,13	0,76 – 2,11	204



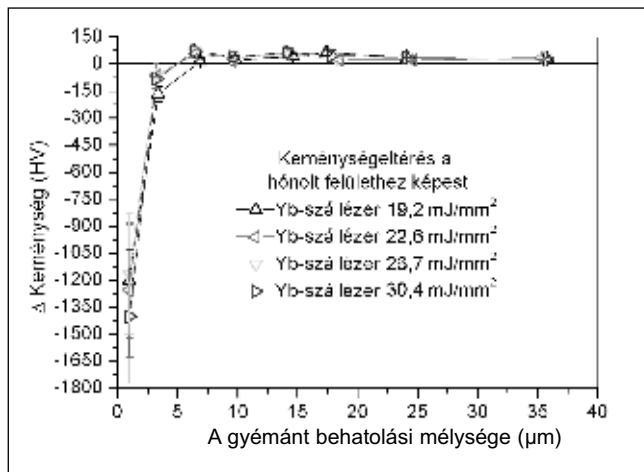
■ 6. ábra. A szabadgrafitüreg-arány (GK) változása Yb-szállézerrel kezelt mintasorozatnál a lézerteljesítmény-sűrűség függvényében



■ 7. ábra. Az alapanyag, a hónolt minta és az Yb-szállézerrel lézersugarasan kezelt minták (a)–d) minták) felületének keménységértékei



■ 8. ábra. Az Yb-szállézerrel kezelt mintasorozat (a)–d) minták keménységértékeiből kivonva az alapanyag keménységértékei



■ 9. ábra. Yb-szállézerrel kezelt mintasorozat (a)–d) minták keménységértékeiből kivonva a hőnolt felület keménységértékei

ezért a mélyebben fekvő grafitlemezek is láthatóvá válnak. Továbbá a lézersugaras kezelés nem zár be, csak kinyit, illetve létrehoz grafitüregeket. Ezért tehát, ha a látható grafitüreg hányada a felületen nő, joggal feltételezhető, hogy ezzel együtt az olajtartó térfogat is növekszik. A fent leírt módon definiált GK-grafitüregarány mérőszám csak és kizárólag két lézerkezelés egyazon anyagon történő összehasonlítására szolgál, és természetesen nem abszolút értékekben adja meg a tényleges olajtartó térfogatot. Mindazonáltal a GK jól jellemzi a mechanikai előmunkálás és az azt követő lézersugaras kezelés együttes hatékonyságát.

### 3.3. Nanoindentációs keménység-mérések

Az összes minta felülete jelentősen keményebb volt az alapanyagénál. Ahogy a 7. ábrán is látható, mechanikus hőnolás után jelentősen megnőtt a felület keménysége, ami a hőnolás által a felületen okozott jelentős képlékeny deformációval magyarázható. A lézersugaras kezelésnél az impulzus során plazma gyűl a felület felett, amely csak a felület tetejét olvasztja meg. A felület keménysége és a lézerteljesítmény növekedése között a vizsgált lézer teljesítménysűrűség-tartományban lineárisan növekvő trend látható. A keménységnövekedés valószínűleg a lézersugaras kezelés utáni ultrafinom szemcseszerkezetnek és a magas diszlokációsűrűségnek a következménye. A hőnolt felületnél keményebb felület létreho-

zásához körülbelül 18 mJ/(mm<sup>2</sup>ns) lézerteljesítmény-sűrűség szükséges. Annak a feltárására, hogy a kezelés mélyebb rétegekben is hatással volt-e a felületre, egyre növekvő terhelések mellett mikrokeménység-méréseket végeztünk.

### 3.4. Mikrokeménység-mérések

A mikrokeménység-értékeket a 8. és 9. ábra mutatja. A keménységértékekből a vízszintes tengelyre a Vickers-keménység képletével kiszámoltuk a gyémánt behatolási mélységét. Először az alapanyag különböző terheléssel mért keménységértékeit kivontuk a kezelt felületek keménységértékeiből (8. ábra). Minden minta keményebbnek mutatkozott az alapanyagnál, különösen az 1-3 μm gyémánt behatolási mélységig. 6 μm-nél nagyobb behatolásnál a hőnolt felület lágyabbnak mutatkozott a lézersugarasan kezeltéknél, míg kisebb behatolásnál ez volt a legkeményebb. Ez a nagy deformációnak és a magas diszlokációsűrűségnek a következménye a felület 1-3 μm-es rétegében. A lézersugarasan kezelt minták keménységértékei a szóráson belül azonosnak tekinthetők.

A 9. ábrán a hőnolt és a lézersugarasan kezelt felületek keménység-értékeit hasonlítottuk össze, ahol a hőnolt felület értékeit kivontuk a lézersugarasan kezeltékeiből. Látható, hogy a lézersugaras kezelés hatására a felületi réteg alatt egy lágyabb réteg található. Ezt a megolvadt felület alatt kilágyult rész okozta, amelyben a lézersugaras kezelés csökken-

tette a diszlokációsűrűséget. Ez a két réteg együttesen lágyabbnak mutatkozott a hőnolt felületnél, körülbelül 6 μm-es gyémánt behatolási mélységig. A legnagyobb energiasűrűséggel kezelt minta volt a leglágyabb, ahol a legmélyebb kilágyult réteg is várható.

## 4. Összegzés

A fenti mérések eredményeiből levonható, hogy a GJL-250 jelű öntöttvas Yb-szállézerrel történő lézersugaras kezelésekor a 0,1369–0,2173 mJ/(mm<sup>2</sup>ns) lézerteljesítmény-sűrűség tartományában a hőnolt felület 1–2 μm mélyen megolvad, és ultrafinom szemcseszerkezetű réteg jön létre. A nanoindentációs keménység-mérések tanulsága szerint az alapanyaghoz képest jelentősen megnőtt a kezelt felület keménysége, és az a lézerteljesítmény függvényében lineárisan nőtt. A mikrokeménység-mérések szerint viszont a hőnolt felület volt a legkeményebb, vagyis a lézeres kezelés látszólag lágyulást okozott. Mivel a mikrokeménység-mérésnek jóval nagyobb a behatolási mélysége, mint a nanoindentációnak, ezért a fenti megfigyelés csak úgy értelmezhető, hogy a felületi vékony, nagy keménységű réteg alatt egy jóval lágyabb réteg jött létre.

A kidolgozott GK szabadgrafitüregarány mérőszám azonos alapanyag-nál jól jellemzi a hőnolás és az azt követő lézersugaras kezelés hatékonyságát. A vizsgált lézerteljesítmény-tartományban azt találtuk, hogy az a teljesítménysűrűség növekedésével monoton nőtt.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönet *dr. Tóth Attilának* a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetéből, ahol a FIB vizsgálatok készültek. Köszönet illeti továbbá *dr. Gubicza Jenőt*, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Anyagfizika Tanszékéről, ahol a nanoindenteres keménységmérések készültek. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A cikk a Bólyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

## Irodalom

- [1] *H. Lindner – H. W. Bergmann – C. Brandenstein – R.Q. Lang – A. S. Reichstein – E. Stengel*: UV-Laserbelichtung von Grauguß-Zylinderlaufbahnen von Verbrennungskraftmaschinen, VDI-Berichte, 1764 (2003) 73–96.
- [2] *L. Migliore*: Laser Materials Processing, Marcel Dekker, inc., New York, 1996.
- [3] *C. E. Webb*: Handbook of laser technology and applications, 3 (2004) 301.
- [4] *J. C. Ion*: Laser Processing of Engineering Materials, Elsevier, 2005.
- [5] *J. F. Ready*: LIA Handbook of Laser Materials Processing, Laser Institut of America Magnolia Publishing, Inc., 2001.
- [6] *X.-b. Liu – G. Yu – J. Guo – Q.-y. Shang – Z.-g. Zhang – Y.-j. Gu*: Analysis of Laser Surface Hardened Layers of Automobile Engine Cylinder Liner, Journal of Iron and Steel Research, International, 14 (2007) 42–46.
- [7] *J. de Damborenea*: Surface modification of metals by high power lasers, Surface and Coatings Technology, 100–101 (1998) 377–382.
- [8] *G. Duffet – P. Sallamand – A. B. Vannes*: Improvement in friction by cw Nd:YAG laser surface treatment on cast iron cylinder bore, Applied Surface Science, 205 (2003) 289–296.
- [9] *J. H. Abboud – K. Y. Benyounis – A. G. Olabi – M. S. J. Hashmi*: Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application, Journal of Materials Processing Technology, 182 (2007) 427–431.
- [10] *T. Xin – Z. Hong – C. Li – Z. Zhihui – R. Lu-quan*: Effects of C content on the thermal fatigue resistance of cast iron with biomimetic non-smooth surface, International Journal of Fatigue, 30 (2008) 1125–1133.
- [11] *G. Knoll – V. Lagemann – R. Lechtape-Grüter – A. Robota – F. Schlerege*: Beeinflussung des Ölverbrauchs von Verbrennungsmotoren durch die Mikrohydrodynamik strukturierter Zylinderbores, VDI-Berichte 1764 (2003) 63–72.
- [12] *L. Byrnes – M. Kramer – G. Flores*: HVOF-Coating of Cylinder Bores, VDI-Berichte, 1764 (2003) 97–110.
- [13] *B. Gérard*: Application of thermal spraying in the automobile industry, Surface and Coatings Technology, 201 (2006) 2028–2031.
- [14] *K. Bobzin – F. Ernst – K. Richardt – T. Schlaefer – C. Verpoort – G. Flores*: Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process, Surface and Coatings Technology, 202 (2008) 4438–4443.
- [15] *P. Andersson – J. Koskinen – S. Varjus – Y. Gerbig – H. Haefke – S. Georgiou – B. Zhmud – W. Buss*: Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces, Wear, 262 (2007) 369–379.
- [16] *L. Herbst – H. Lindner – M. Heglin – T. Hoult*: Targeting diesel engine efficiency, in: Industrial laser solutions for manufacturing, 2004.
- [17] *K. Májlínger – P. J. Szabó*: Measuring the effects of some laser parameters on the surface and near surface region of laser treated cast iron cylinder bore, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 52 (2008) 71–76.
- [18] *K. Májlínger – P. J. Szabó*: The effects of some laser parameters on the surface and near surface region of laser treated cast iron cylinder bore, Journal of Physics: Conference Series, 240 (2010) 1–4.
- [19] *K. Májlínger – P. J. Szabó*: Laser Treatment of Cast Iron Engine Cylinder Bore with Nanosecond Laser Pulses, Materials Science Forum, 659 (2010) 319–324.
- [20] *K. Májlínger – P. J. Szabó*: Robbanómotor-hengerek futófelületének lézersugaras kezelése, Bányászati és Kohászati Lapok Kohászat, 142 (2009) 41–46.
- [21] *J. M. Radzikowska*: Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures, Materials Characterization, 54 (2005) 287–304.
- [22] *W. Y. Kwong – W. Y. Zhang*: Electron-beam assisted platinum deposition as a protective layer for FIB and TEM applications, in: Semiconductor Manufacturing, 2005. ISSM 2005, IEEE International Symposium on, 2005, pp. 469–471.
- [23] *P. R. Munroe*: The application of focused ion beam microscopy in the material sciences, Materials Characterization, 60 (2009) 2–13.
- [24] *K. Májlínger – K. Bobor*: Felületi réteg kialakulása öntöttvas motorblokkok hengerfuratának falán lézerkezelés hatására, OGÉT 2010 – XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, (2010) 273–276.
- [25] *K. Májlínger – P. J. Szabó – K. Bobor*: Formation of surface layer on cast iron cylinder bore due to nanosecond laser impulses, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 53 (2009) 75–80.