

MÁJLINGER KORNÉL – SZABÓ PÉTER JÁNOS

## Robbanómotor-hengerek futófelületének lézersugaras kezelése

**Az egyre szigorodó európai károsanyag-kibocsátási normák betartása érdekében az egyik nagy európai gépjárműgyártó cég a belsőégésű motorjainak hengerfuratán lézersugaras kezelést végez. Ezen cikk keretében lemezgrafitos öntöttvasból készült motorok henger-futófelületének lézerkezelt rétegét vizsgáltuk műszerezett mikrokeménységmérővel és Ga-ionforrással felszerelt pásztázó elektronmikroszkóppal. Cikkünkben két lézertípussal három különböző konfigurációban elvégzett felületkezelési kísérlet mintadarabjainak vizsgálati eredményeit mutatjuk be.**

### Bevezetés

A motorfejlesztést két fő tényező határozza meg. Az egyik az a vevői igény, hogy a belsőégésű motorok minél gazdaságosabban legyenek, a másik pedig az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások és a növekvő üzemanyagárak. A vevők gazdaságossági igénye azt jelenti, hogy növekvő motorteljesítmény mellett sem növekedhet az üzemanyag- és olajfogyasztás, ezen felül megkövetelik még a hosszú élettartamot is. Mindezek alapján a fő fejlesztési irányok: az üzemanyag- és olajfogyasztás csökkentése, valamint a motorélettartam növelése [1].

A fogyasztáscsökkentés vagy teljesítménynövelés Otto- és dízelmotoroknál egyaránt nagyobb égéstéri nyomással jár. Ez a megnövekedett nyomás nagyobb erővel nyomja a dugattyúgyűrűt a hengerfalhoz, ami nagyobb tribológiai terhelést, tehát nagyobb kopást jelent mindkét alkatrészs számára. A kopás csökkenti a mo-

tor élettartamát, és ezzel együtt csökken a motorban a henger és a dugattyúgyűrűk közti gáz- és olajtömítettség. Ezáltal megnövekedik az olajfogyás és az égésgázok áteresztése az égéstérből a dugattyútérbe. Mindkét jelenség növekvő károsanyag-kibocsátáshoz és csökkenő hatásfokhoz vezet [1].

A tribológiai tulajdonságok javítása és a motorélettartam növelése érdekében az egyik nagy európai gépjárműgyártó cég dízelmotorjainál és V-elrendezésű benzínmotorjainak hengerfuratán lézersugaras kezelést végez, a hengerfalak tulajdonságainak megváltoztatása érdekében. Ezzel a kezeléssel, teljesítménynövekedéssel és fogyasztáscsökkenéssel együtt járó tribológiai terhelésnövelés vált lehetővé a hengerfurat és a dugattyúgyűrű közti részben, csökkenő olajfogyasztás, jó károsanyag-kibocsátás és hatásfok mellett. A lézeres kezelés hatására megnőtt a hengerfurat felületközeli rétegének keménysége, kopásállósága, továbbá a szövet-

szerkezetből adódóan olajtartó térfogatnövekedés jött létre [1, 2].

### Lézeres kezelés

A motorblokkok anyaga lemezgrafitos, ill. átmenetigrafitos öntöttvas. A lézeres kezelés célja az anyag felső rétegének átvasttása. Az olvasztással egyidejűleg a felületen lévő grafitlemezekből a lézersugár által gerjesztett plazma kiegészíti a grafitot, így gyakorlatilag ezek a „lyukak” (kiegészített grafit helyek) egymással nem kommunikáló olajtartó rendszerként funkcionálnak [4]. Ezt az eljárást az EP 1 738 859 A1 jelű szabadalom védi. Jelenleg a hengerfuratok falának lézeres kezelésére a szériagyártásban Xe-Cl excimer lézert (LAMBDA STEEL 1000) alkalmaznak, melynek a hullámhossza 308 nm (UV-tartomány), a lézerimpulzusok frekvenciája 300 Hz. A lézer átlagos teljesítménye 300 W. A jelenlegi lézeres kezelés során a munkadarab felületét 3,4×6,4 mm-es téglalap alakú folttal, meghatározott raszter szerint, négyszeres átfedéssel kezelik.

A lézeres kezelés során állítható paraméterek a következők:

- átfedés mértéke – pásztázási stratégia,
- átlagos lézer-energiásűrűség a felületen,
- pásztázási sebesség.

További kísérletek folynak más lézertípusok alkalmazhatóságának vizsgálatára, mivel az excimer gázlézereknek meglehetősen nagy a karbantartási igénye és az üzemeltetési költsége a szilárdtestlézerekhez képest. További hátránya még a jelenleg alkalmazott lézereknek, hogy az optikai kicsatolás geometriai adottságai miatt a pásztázáskor az egész motorblokkot kell a lézerfej körül forgatni, és ez jelentősen korlátozza a lézerkészülék telje-

**Szabó Péter János** okleveles villamosmérnök, a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének egyetemi docense. 1995-ben PhD fokozatot szerzett a nagyfelbontású röntgen vonalprofil-analízis témaköréből. Fő kutatási területe az anyagok elektronmikroszkópos vizsgálata, ezen belül a szemcsehatárok szerepének tisztázása egyes fémfizikai folyamatokban.

**Májlinger Kornél** okleveles gépészmérnök 2007-ben szerzett diplomát Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karán, jelenleg másodéves doktorandusz a BME Gépészmérnöki karán az Anyagtudomány és Technológia Tanszéken.

sítményének kihasználhatóságát. Mindamellet nem elhanyagolható szempont, hogy a berendezésnek jelentős a helyigénye.

Cikkünk két további lézertípussal, három különböző konfigurációban elvégzett felületkezelési kísérlet mintadarabjainak mikrokeménységmérővel, valamint fókuszált ionsugárral (Focused Ion Beam (FIB)) kombinált pásztázó elektronmikroszkóppal történő vizsgálatát mutatja be. A minták anyaga GJL-270 jelű lemezgrafitos öntöttvas. A főbb lézertípusok az 1. táblázatban láthatók.

Az „A” és „B” jelű minta között csak a lézerezési stratégiában van eltérés, az „A” jelű mintát a lézertubus bevezetésekör négyszeres átfedéssel lézereztek. A „B”, „C” és „D” jelű mintákat pedig a lézertubus bevezetésekör kétszeres átfedéssel és kiemelésük szintén kétszeres átfedéssel lézereztek.

### Mikrokeménységmérés

A mikro- és makrokeménységmérés közötti határt 2 N terhelőerőnél, viszont a mikro- és nanokeménységmérés közötti határt 0,2 μm-es szűrőtest behatolási mélységnél határozták meg. Esetünkben, mint látni fogjuk, mikrokeménységmérést végeztünk.

A keménységmérés FISCHERSCOPE® HM2000 XY készülékkel történt, mely DIN EN ISO 14577 szerinti mikrokeménység-

1. táblázat. A fontosabb lézertípusok paraméterei

Minta	Lézertípus / gyártó	Egy lézertípus impulzus ideje	Lézertípus frekvenciája	Átlagos energiasűrűség
A	Nd-YAG / Rofin	40 ns	6000 Hz	52 mJ/mm <sup>2</sup>
B	Nd-YAG / Rofin	40 ns	6000 Hz	52 mJ/mm <sup>2</sup>
C	Nd-YAG / Rofin	160 ns	6000 Hz	50 mJ/mm <sup>2</sup>
D	Szállézer / IPG	140 ns	12500 Hz	49 mJ/mm <sup>2</sup>

mérésre alkalmas. A készüléket egy Vickers-gyémánttal felszerelt keménységmérőfejjel használtuk. A keménységmérő mérőmikroszkóp is található, így a keménységmérés helye pontosan meghatározható.

A mérőegység egyszerre regisztrálja a szűrőtest behatolási mélységét (h) ±100 pm felbontással és az ehhez szükséges erőt (F) ± 0,04 mN felbontással, így a felhasználó a számítógépes kiértékelő szoftver segítségével egyetlen mérésből megtudhatja a felület keménységét és a keménységletfutást a felületközeli rétegekben, továbbá információt kaphat az anyag rugalmas és képlékeny tulajdonságairól is. Az 1. ábrán a dinamikus mélységérzékelő keménységmérés elvi vázlata, a 2. ábrán a regisztrált erő- szűrőtestbehatolási görbe látható. A mérésből DIN EN ISO 14577 szerint a következő mennyiségek számolhatók [3, 4]:

• Martens-keménység  $HM^1$ :  $HM = \frac{F}{A_S(h)}$

ahol  $A_S(h)$  a szűrőtest-behatoláskor a gyémántgúla h mélységben mért keresztmetszete. Fontos, hogy a mért behatolási mély-

ségnek van rugalmas komponense is, hiszen  $h = h_c + h_e$ , ahol  $h_c$  a maradék alakváltozáshoz,  $h_e$  pedig a rugalmas alakváltozáshoz tartozó szűrőtest behatolási mélység.

• „benyomódásos keménység”  $H_{IT}^2$  anyagok plasztikus viselkedésének vizsgálatára alkalmas mérőszám:  $H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p(h_c)}$ ,

ahol  $S = \left( \frac{dF}{dh} \right)_{h=h_{max}}$  a tehermentesítésnél

mért kezdeti merevedésség és  $h_c = h_{max} \cdot \frac{\varepsilon \cdot F_{max}}{S}$  Vickers- és Berkovich-szűrőtestre  $\varepsilon = 0,75$ .

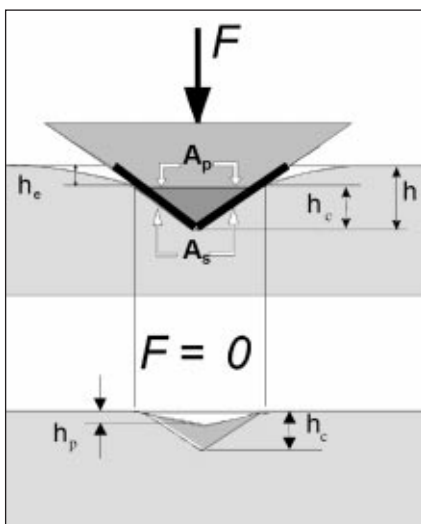
• Rugalmas behatolási modulus  $E_{IT}$ :

$$E_{IT} = (1 - \nu_s^2) \left( \frac{2\sqrt{A_p(h_c)}}{S \cdot \sqrt{\pi}} - \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \right)^{-1}$$

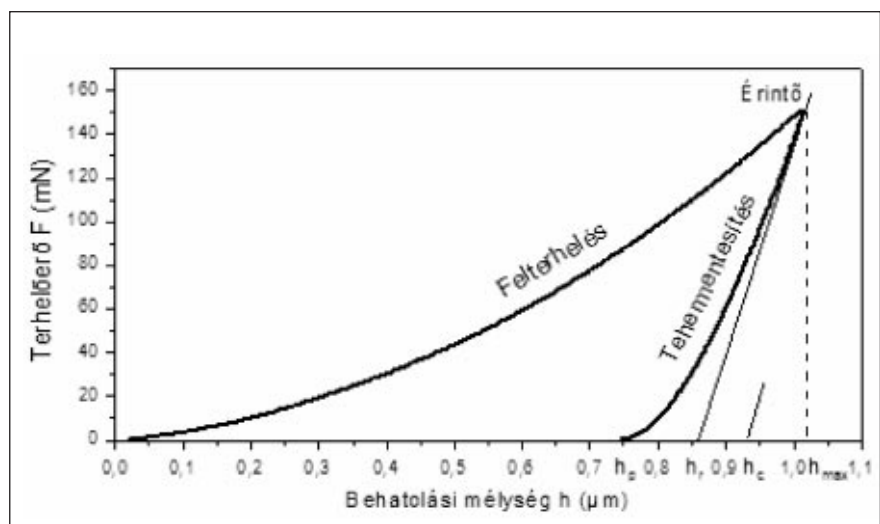
Az S kezdeti merevedésség felhasználásával leírható egy  $E_{IT}$  anyagparaméter, amely a felület rugalmas viselkedését írja le a keménységmérés során, korrelációban áll a rugalmassági modulusal, de nem azonosak.  $E_i$  a szűrőtest rugalmassági modulusa,  $\nu_s, \nu_i$  a próba és a szűrőtest Poisson számai.

• A relatív behatolási mélységváltozás

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100,$$



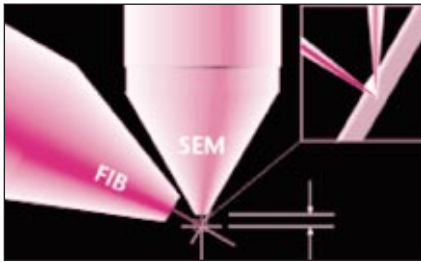
1. ábra. A dinamikus keménységmérés elvi ábrája [4]



2. ábra. Dinamikus mélységérzékelő mikrokeménységméréskor regisztrált F-h görbe

<sup>1</sup> Korábban HU univerzális keménységnek hívták

<sup>2</sup> Angolul: Indentation Hardness



■ 3. ábra. SEM+FIB sugárforrás elrendezése [7]

amely állandó terhelés melletti benyomódási-mélységváltozást írja le.

•  $\eta_{IT}$  a szűrőtest behatolási munkájának a rugalmas alakváltozáshoz tartozó százalékos hányada

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \times 100$$

• további mennyiségek, mint pl. Martens-keménység meghatározott terhelésnél vagy maradó alakváltozásnál stb.

A keménységmérések a lézerezett hengerfutófelületen történtek. Először a motorblokkok hengerfalából kb. 10×10 mm nagyságú próbadarabokat munkáltunk ki mechanikus úton, majd a próbadarabok hátoldalának síkba munkálása és tisztítása után a mérőeszköz asztalára ragasztottuk fel. A mérési pontokat úgy választottuk ki, hogy lehetőleg ne legyenek grafitkiválások a közelben.

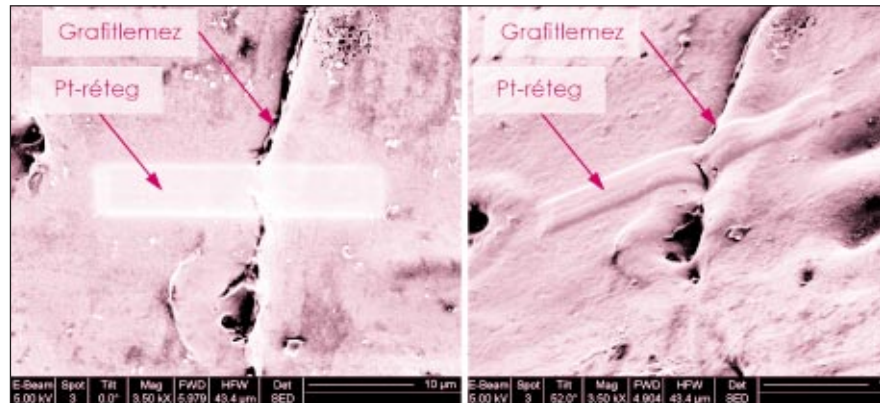
A méréseinket 150 mN és 1000 mN terhelőerővel végeztük, a 2. táblázat szerinti paraméterek mellett.

### Fókuszált ionsugaras vizsgálatok (Focused Ion Beam)

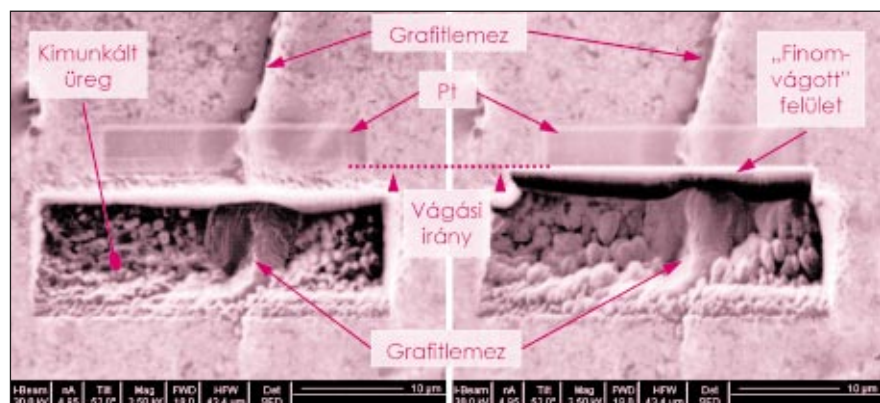
A fókuszált ionsugaras (Focused Ion Beam, FIB) vizsgálatok FEI Nova Nanolab 600 típusú SEM/FIB elektronmikroszkóppal készültek. Ez egy SEM/FIB duál-sugaras gép, amely egy pásztázó elektronmikroszkóp és egy fókuszált Ga-ionsugár kombinációja, így alkalmazható akár 100 nm-nél kisebb struktúrák megmunkálására, prototípuskészítésre és -vizsgálatra. Egyesíti a téremissziós katódos pásztázó elektronmikroszkóp kiváló felbontóképességét és a pontosan fókuszált ionsugár maratási és pásztázó ionporlasztási képességét. Ezen elektronmikroszkóppal lehetőség van a mintafelületet akár elektron-, akár ionsugárral leképezni [5]. A készülékben található egy gázinjektor-rendszer, melynek tujén keresztül különböző gázok vezethetők a minta felületére pár mikrométeres távolságból. A külön-

2. táblázat. A mikromélységméréshez használt fő paraméterek és a maximális behatolási mélység

Terhelőerő (mN)	Terhelésfutási idő (s)	Erőtartási idő (s)	Max. behatolási mélység (μm)
150	40	5	1,4
1000	20	5	4,7



■ 4. ábra. Ga-ionokkal lerakott Pt-réteg egy lézerezett minta felületén két különböző szögű, a felület alatt egy grafitlemez található



■ 5a. ábra. A kimunkált üregben jól látszik, hogy a grafitot kevésbé porlasztotta az ionsugár

■ 5b. ábra. A kimunkált üreg „finomvágott” fala

böző gázkeverékekkel növelhető a maratási teljesítmény, de akár különböző fémek (Pt, W) vagy szigetelőrétegeket (SiO<sub>2</sub>) is felvihetünk vele a minta felületére [6].

A vizsgálatokat a következő módon, 5 lépésben végeztük:

1. lépés: Először a motorblokkok hengerfalából kb. 10×10 mm nagyságú próbadarabokat munkáltunk ki mechanikus úton, majd a próbadarabok hátoldalának síkba munkálása és tisztítása után vezető ezüstpasztával Al-mintatartókra ragasztottuk őket.

2. lépés: A mintadarabokra a gázinjektor rendszeren keresztül bevezetve 20×3 μm Pt-réteget raktunk fel kb. 1 μm-es rétegvastagságban (4. ábra). Ennél a berendezésnél a Ga-ionforrással történő ré-

teglerekáskor, képalkotáskor, ill. anyageltávolításkor a mintákat el kell forgatni 52°-kal az elektronsugárhoz képest az ionforrás irányába, hogy a sugár merőleges legyen a minta felületére (3. ábra).

3. lépés: A felvitt Pt-réteg mentén a próbatestre merőlegesen egy lépcsőzetes üreget munkáltunk ki Ga-ionsugárral történő „bombázással” (5a. ábra). A Pt-rétegre azért van szükség, mivel a kimunkált üreg minta felületére merőleges fala kismértékben lekerekedik – a hagyományos metallográfiai mintaelőkészítéshez hasonlóan –, ez az effektus így a Pt-rétegben jelentkezik, ill. ha transzmissziós elektronmikroszkóppal munkálunk ki próbatestet, a felvitt platinára szükség van a minta kiemelésénél és a további manipulációnál.

4. lépés: A kimunkált üreg merőleges fala felől csökkentett ionnyaláb-árammal további anyageltávolítást, „finomvágást” végeztünk az árok teljes mélységéig a jobb felületi minőség érdekében (5b. ábra). Az így kapott merőleges felület méretei kb.  $20 \times 7 \mu\text{m}$ .

5. lépés: Ezt a felületet ionsugárral történő pásztázással „marattuk”, ill. a felületről ionsugárral képet alkottunk (6. ábra). Fontos megjegyezni, hogy ionsugaras képfelvételkor a minta felülete nem merőleges az ionnyaláb hossztengelelyére – különben nem látnánk az árokba –, hanem vele  $52^\circ$ -szögben áll, ezért a függőleges lépték nem egyezik meg a vízszintessel.

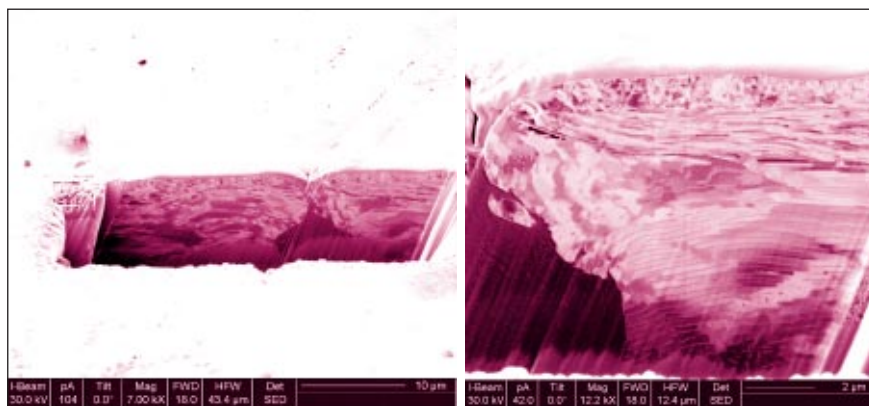
A további mintavétel és vizsgálat helyét – a fenti képektől eltérően – igyekeztünk úgy megválasztani, hogy ne legyenek grafitkiválások a közvetlen közelben. A további ionsugaras vizsgálatok során alkalmazott fő paramétereket a 3. táblázat tartalmazza.

## Eredmények

### Mikrokeménységmérés

A 7. és 8. ábrán látható keménységgörbék hét különböző helyen mért keménységfutamok középértékei. A görbék a behatolási mélység szerint  $0,1 \mu\text{m}$ -ról indulnak, mivel a gyémántkúp felütközésekor az első  $100 \text{ nm}$ -en az eredményeknek több nagyságrend szórása volt. A görbék szórása minden görbénél kb.  $\pm 500 \text{ N/mm}^2$ .

A  $150 \text{ mN}$ -os terheléssel kapott keménységértékek szerint (4. táblázat) az



6. ábra. Ionsugaras felvétel a lézerkezelt mintába munkált üregről és nagyobb nagyításban annak faláról

3. táblázat. Fókuszált ionsugaras vizsgálatokhoz használt főbb ionsugár paraméterek

FIB műveleti lépés	Gyorsító-feszültség	Ionsugár-áram
Lépcsőzetes üreg kimunkálása	30 kV	3 nA
„Finomvágás”	30 kV	300 pA
Ionsugaras maratás	30 kV	30 pA
Ionsugaras képfelvétel	30 kV	10 pA

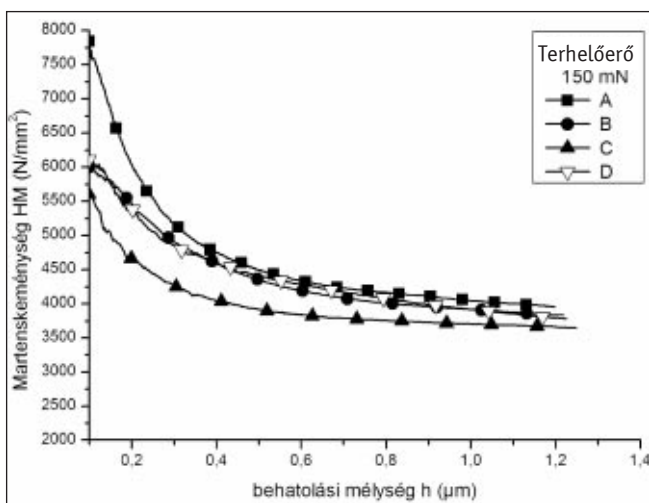
„A” jelű minta  $0,4 \mu\text{m}$ -ig jóval keményebb, mint a másik három minta, idáig a keménységértékek folyamatosan csökkennek, majd tartanak a kb.  $3700 \text{ HM}$  értékhez. A „B” és a „D” jelű minták tulajdonképpen azonosnak tekinthetők, a leglágyabb karakterisztikát a „C” jelű minta mutatta.

Az  $1000 \text{ mN}$ -os terheléssel mért keménységértékek szintén  $0,4 \mu\text{m}$ -ig jelentős mértékben (kb.  $3800 \text{ HM}$ ) csökkennek a próbatest belseje felé, majd jóval nagyobb eltérést mutatnak egymáshoz képest, mint kisebb mérőterhelésnél. Ez nem meglepő, hiszen mint látni fogjuk, a lézerkezelt réteg vastagsága csak  $1 \mu\text{m}$  körüli. A „B” és „D” jelű minták itt is tulaj-

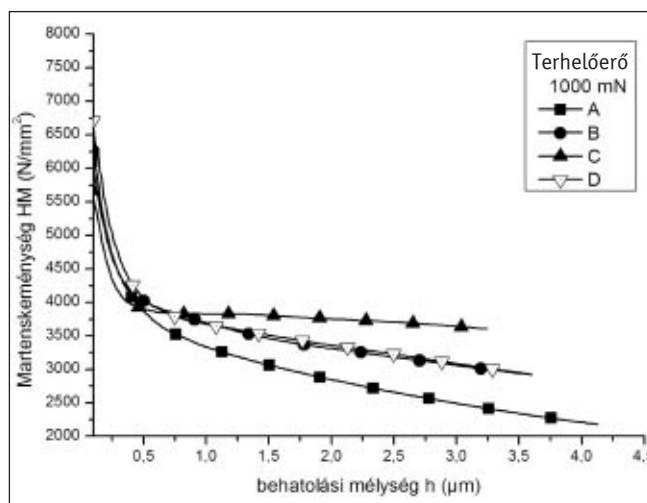
donképpen azonosnak tekinthetők, az „A” jelű minta viszont e terhelés mellett a lágyabb jelleget mutatta, aminek az oka még nem ismert. A „C” jelű minta keménységértékei az anyag belseje felé haladva gyakorlatilag azonosak a kisebb terhelőerővel mértekkel.

### Fókuszált ionsugaras vizsgálatok (FIB)

A keresztmetszeti FIB-képeken (9–12. ábra) jól látható a rendkívül finomszemcsés lézerkezelt réteg és alatta a jóval nagyobb szemcseméretű alapanyag szövetszerkezete. Az ultrafinomszemcsés réteg valószínűleg a nagy hűlési gradiens következménye.



7. ábra. A  $150 \text{ mN}$ -os terhelőerővel felvett keménységgörbék



8. ábra. Az  $1000 \text{ mN}$ -os terhelőerővel felvett keménységgörbék

**4. táblázat.** A 100 nm-es mélységben mért Martens keménységek  $HM_{150mN}$  – 150 mN-os és  $HM_{1000mN}$  – 1000 mN-os terhelőerőnél

Minta	$HM_{150mN}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$HM_{1000mN}$ (N/mm <sup>2</sup> )
A	7700	6200
B	6000	6300
C	5700	5700
D	6200	6700

**5. táblázat.** A lézerkezelt rétegben meghatározott szemcseméreték FIB- és TEM-képeken mérve

Minta	$\bar{d}_{FIB}$ (nm)	$d_{TEM}$ (nm)
A	386	150-560
B	179	160-360
C	222	100-400
D	250	---

Az átlagos szemcseméret meghatározása egy összeillesztett ionsugaras képen történt, ez a kép több egymás melletti területről készült ionsugaras kép összeillesztve, így a vizsgált terület kb.  $7 \times 20 \mu m$  volt. Az átlagos szemcseméret meghatározása három vonal mentén történt: az összeillesztett ionsugaras kép lézerkezelt rétegébe 3 vonalat húztunk (szemcsehatártól szemcsehatárig) és megszámoltuk az elmetszett szemcséket.

Így a szemcseméret:  $d_i = \frac{l_i}{n_i}$ ,

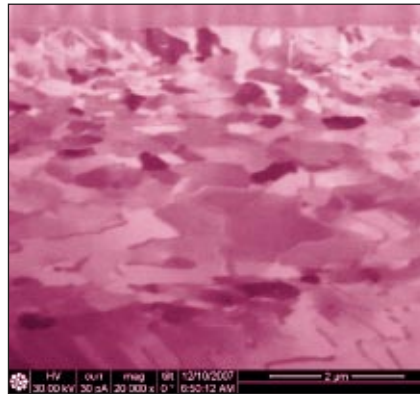
ahol  $l_i$  az aktuális vonal hossza és  $n_i$  az aktuális vonal által metszett szemcsék száma. Ebből az átlagos szemcseméret a három szemcseméret átlaga:

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{i}$$

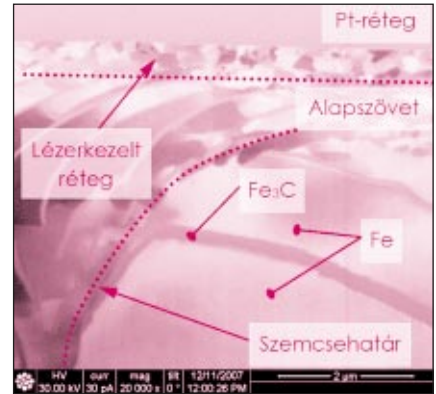
Az így kapott szemcseméreteket és a TEM-képeken (pl.: 13. ábra) mért szemcseméreteket szélsőértékeiket ( $d_{TEM}$ ) az 5. táblázat tartalmazza.

A lézerkezelt minták FIB-képein, Image-Pro Plus képelemző programmal meghatároztuk az átolvasztott rétegvastagságokat. A rétegvastagságokat keresztcsiszolati SEM-képeken, ill. a TEM-képeken is ellenőriztük. A különböző módszerekkel mért rétegvastagságok a 6. táblázatban láthatóak.

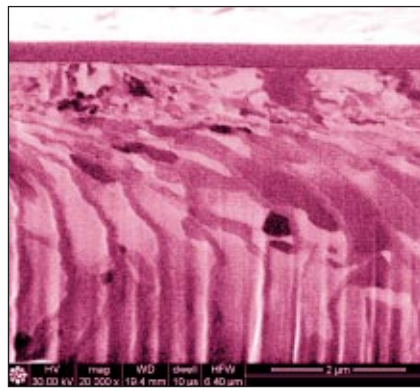
A motorblokkok hengerfuratainak mechanikus megmunkálásánál (fúrás, honolás) a grafitlemezek egy részét betemeti a rákenődött alapanyag, egy részük szabad marad. Lézerkezeléskor ezeknek a lamel-



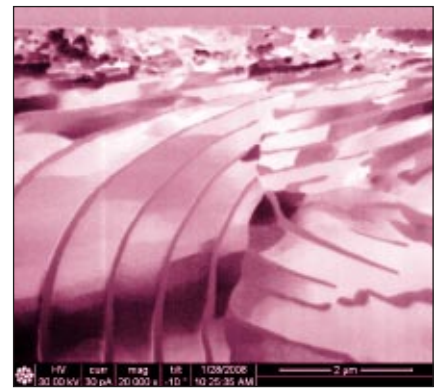
**9. ábra.** Ionsugárral készített felvétel az „A” jelű minta keresztmetszetéről



**10. ábra.** Ionsugárral készített felvétel a „B” jelű minta keresztmetszetéről



**11. ábra.** Ionsugárral készített felvétel a „C” jelű minta keresztmetszetéről



**12. ábra.** Ionsugárral készített felvétel a „D” jelű minta keresztmetszetéről

**6. táblázat.** A hengerfutófelületen lézerkezeléssel létrehozott rétegek vastagsága  $R_{FIB}$  - FIB-,  $R_{SEM}$  - SEM- és  $R_{TEM}$  - TEM-képeken mérve

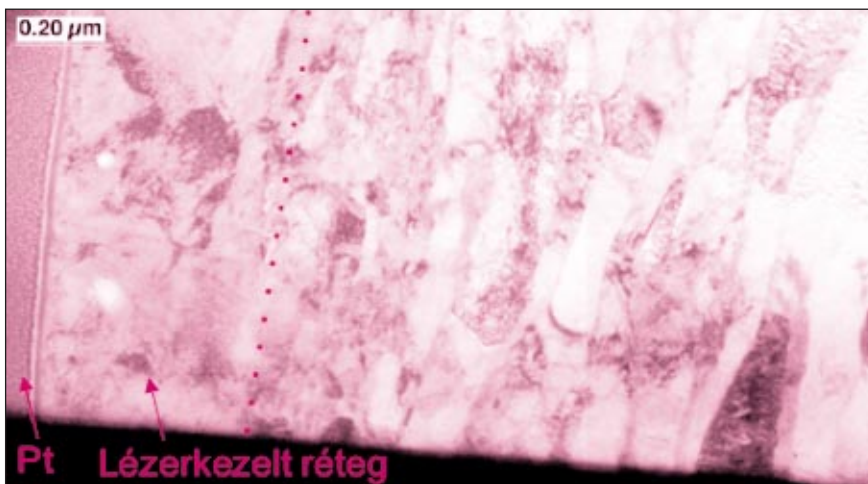
Rétegvastagságok			
Minta	$R_{FIB}$ ( $\mu m$ )	$R_{SEM}$ ( $\mu m$ )	$R_{TEM}$ ( $\mu m$ )
A	0,76 – 0,93	0,52 – 1,26	---
B	0,65 – 0,71	0,57 – 1,01	0,5
C	0,85 – 1,18	0,65 – 1,19	1,1
D	0,53 – 1,00	---	0,5 – 0,8

láknak egy része elpárolog és egy része szabadabbá válik – a vékony ferritfelkenődés megolvad és valószínűleg a felületi feszültség miatt a lamella két oldalán kis kitüremkedéssé olvad össze – ezekbe az üregekbe kerül bele az olaj a motor üzemelésekor. Így gyakorlatilag az elpárologtatott grafitlemezek helyén keletkezett üregek a szövetszerkezetből fakadó olajtartó-térfogatokat alakítanak ki. Mivel ezek egymással nem összefüggőek, elősegítik a hidrodinamikai kenés kialakulását a dugattyúgyűrűk és a hengerfal között [1, 2]. Ezért tehát nem mindegy, hogy a felületen lévő „betemetett” grafitkiválások hány százalékát tette szabaddá a lézerkezelés, és ezzel együtt mennyi „graftüreg” fogja a súrlódási viszonyokat befo-

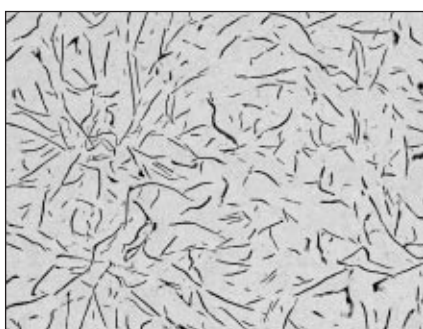
lyásolni. Ennek meghatározására definiáltuk a GK-graftkinyílást, aminek a meghatározása a következőképpen történt:

Először is keresztmetszeti csiszolaton és a lézerkezelt felületen elektronmikroszkóppal visszaszórt elektron detektorral (BSE) – a jó grafit-alapanyag kontraszt érdekében – készítettünk képeket (pl.: 14. ábra). Ezekon a képeken Image-Pro Plus programmal meghatároztuk a grafit felülethez viszonyított arányát (pl.: 15. ábra). Így a csiszolaton levő grafitarányt  $G_{csiszolat}$ -tal jelöltük, a felületen levő grafitarányt pedig  $G_{felület}$ -tel. Ebből a grafitkinyílás:

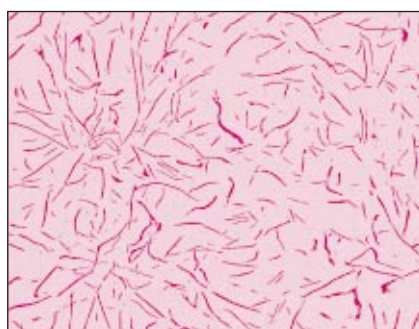
$$GK = \frac{G_{csiszolat}}{G_{felület}} \cdot 100 \text{ (‰)}$$



■ 13. ábra. TEM-felvétel a „C” jelű minta lézerkezelt rétegről, ill. a mechanikusan erősen alakított felületközeli rétegről



■ 14. ábra. BSE-detektorral készített SEM-felvétel egy minta polírozott keresztcsiszolatáról



■ 15. ábra. A grafit arányának mérése Image-Pro Plus programmal a 14. ábra SEM-felvételel

A grafitarányok mérésének eredményei a 7. táblázatban láthatók.

### Összegzés

A fontosabb mérési adatokat a 8. táblázat foglalja össze.

Amint ezt a keménységgörbékből látni lehet, a lézerkezelés utáni felület minden esetben jelentősen keményebb lett, mint az alapanyag. Ez nagyrészt a jelentősen szemcsefinomodott szövetszerkezetnek tudható be a lézerkezelt felületi rétegben, bár a keménységnövekedés nem volt arányos a szemcseméret csökkenésével.

A legnagyobb rétegvastagság a „C” jelű mintán volt látható, ami egyben a leggyabb is volt. Ez valószínű a többi lézerhez képest viszonylag hosszú, 160 ns-os lézerimpulzusok következménye.

A legnagyobb arányú grafitkinyílás a „D” jelű mintán volt megfigyelhető. A továbbiakban különböző lézerparaméterekkel kezelt mintadarabok vizsgálatát tervezzük, illetve a felületiréteg ötvözőeloszlásának meghatározására GDOS (Glow Discharge Optical Emission Spektrométer) vizsgálatokat kívánunk végezni.

8. táblázat. Lézerkezelt futófelületek jellemzésére használt fontosabb mérési adatok

Minta	HM <sub>150mN</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	HM <sub>1000mN</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	$\bar{d}_{FIB}$ (nm)	R <sub>FIB</sub> (μm)	G <sub>felület</sub> (%)	GK (%)
A	7700	6200	386	0,76 - 0,93	6,75	64,1
B	6000	6300	179	0,65 - 0,71	4,98	55,8
C	5700	5700	222	0,85 - 1,18	4,97	53,3
D	6200	6700	250	0,53 - 1,00	6,70	77,9

7. táblázat. Grafitarányok BSE-képeken mérve

Minta	G <sub>csiszolat</sub> (%)	G <sub>felület</sub> (%)	GK (%)
A	10,53	6,75	64,1
B	8,92	4,98	55,8
C	9,33	4,97	53,2
D	8,60	6,70	77,9

### Köszönetnyilvánítás

Köszönet a Göttingeni Egyetem Szilárdtestfizika Intézetének, melynek laboratóriumában a mikrokeménységmérést és az ionsugaras vizsgálatokat végeztük. Köszönet továbbá a Saarbrückeni Egyetemnek, melynek FIB laboratóriumában a 3-6. ábrák ionsugaras képei készültek. Köszönjük az OTKA támogatását (OTKA T 048895). Szabó Péter János köszöni az MTA Bolyai János Ösztöndíj támogatását.

### Irodalom

- [1] H. Lindner, H. W. Bergmann, C. Brandenstein, A. Lang, R. Queitsch, S. Reichstein, E. Stengel: UV-Laserbelichtung von Grauguß-Zylinderlaufbahnen von Verbrennungskraftmaschinen – VDI-Berichte NR. 1764, 2003
- [2] L. Herbst, H. Lindner, M. Heglin, T. Hoult: Targeting diesel engine efficiency – Industrial Laser Solutions application report, 2004
- [3] [http://www.helmut-fischer.com/globalfiles/DE\\_HM2000\\_PICO\\_DE.pdf](http://www.helmut-fischer.com/globalfiles/DE_HM2000_PICO_DE.pdf) – 2008. 04. 04.
- [4] [http://www.dgm.de/past/2004/werkstoffpruefung/download/687\\_34.pdf](http://www.dgm.de/past/2004/werkstoffpruefung/download/687_34.pdf) – 2008.06.08.
- [5] [http://www.nanoscience.hu/education/anyagtudomany/08\\_pasztazo.pdf](http://www.nanoscience.hu/education/anyagtudomany/08_pasztazo.pdf) – 2008. 04. 10.
- [6] [http://www.fe.i.com/uploadedFiles/Documents/Content/2006\\_06\\_Nova600NanoLab\\_pb.pdf](http://www.fe.i.com/uploadedFiles/Documents/Content/2006_06_Nova600NanoLab_pb.pdf) – 2008. 05.18.
- [7] [http://www.ante.hu/images/szolgaltatasok\\_fib\\_abra.png](http://www.ante.hu/images/szolgaltatasok_fib_abra.png) – 2008.06.10.