

***Motorblokk-hengerfurat futófelületi
tulajdonságainak változása lézersugaras
kezelés hatására***

Tézisfüzet

Májlinger Kornél
okleveles gépészmérnök
IWE / EWE

Témavezető:
Szabó Péter János egyetemi docens, PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Anyagtudomány és Technológia Tanszék

**Budapest
2010**

A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények

Ebben a felsorolásban a saját publikációimat sorolom fel a megjelenésük szerint időrendben haladva (a legrégebbitől a legújabbig).

- [1] **Májlínger, K., Szabó, P.J.** Measuring the Effects of Some Laser Parameters on the Surface and Near Surface Region of Laser Treated Cast Iron Cylinder Bore. *Periodica Polytechnica Mech. Eng.* 2008/2., 52. kötet old.: 71-76.
- [2] **Májlínger, K., Szabó, P.J.** Robbanómotor-hengerek futófelületének lézersugaras kezelése. *Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat.* 2009/2 142. kötet old.: 41-46.
- [3] **Májlínger, K., Szabó, P.J.** 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.* 2010., 240 kötet doi:10.1088/1742-6596/240/1/012169
- [4] **Májlínger, K., Szabó, P.J.** Laser Treatment of Cast Iron Engine Cylinder Bore with Nanosecond Laser Pulses. *Materials Science Forum.* 659 (2010) 319-324. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.659.319
- [5] **Májlínger, K., Szabó, P.J., Révész, Á.** Formation of Surface Layer due to Laser Treatment of cast iron. *Gépészet 2010, Proceedings of 7th International Conference on Mechanical Engineering 2010, (CD-ROM)* old.: 42-47. (2010)
- [6] **Bobor Kristóf, Májlínger Kornél:** Felületi réteg kialakulása öntöttvas motorblokkok hengerfuratának falán lézerkezelés hatására. *OGÉT 2010 Konferenciatickk,* old.: 283-286. (2010)
- [7] **Bobor, K., Májlínger, K., Szabó, P.J.** Formation of Surface Layer on Cast Iron Cylinder Bore due to Nanosecond Laser Impulses. *Periodica Polytechnica Mech. Eng.* 2010/2 (közlésre elfogadva megjelenés alatt)

Az értekezés bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetők

6. Tézis [1] [2] [3] [4] [5]

Az általam kidolgozott és a dolgozatban ismertetett képfeldolgozó módszer lehetővé teszi a lézersugaras kezelés utáni szabad grafitüreg-arány (GK) mérést. A $GK = \frac{G_{felület}}{G_{csiszolat}}$ módon megadott grafitkinyílás – ahol $G_{felület}$ a lézersugarasan kezelt felületen mért grafitüreg területaránya és $G_{csiszolat}$ a csiszolaton mért grafitüreg területarány – megbízhatóan jellemzi a lézeres kezelés hatását az olajtartó térfogat arányára.

Bebizonyítottam, hogy a lézersugaras kezelés hatására azonos motorblokkból származó alapanyagánál (GJL 250), 140 ns-os impulzushosszúságú Yb-szállézernél a teljesítménysűrűség növekedésével a 0,1129-0,2173 mJ/(mm²ns) teljesítménysűrűség tartományban GK értéke monoton növekszik.

Az eredmények hasznosítása

Az általam végzett kutatómunka betekintést ad a motorblokkgyártásban alkalmazott lézersugaras kezelés hatására GJL-250 jelű lemezgrafitos öntöttvas esetében. A különböző lézertípusokkal gyártott minták összehasonlítható eredményt adtak, így lehetővé vált a szériagyártásban használt excimerlézer, gazdaságosabb szállézerre cserélése. Meghatároztam egy minimális lézer energiasűrűséget, mely megfelelő felületi minőséget ad a motorikus üzemeltetéshez.

A különböző vizsgálati eljárások korlátait megvizsgálva sikerült a különböző felületi rétegek keménységét összehasonlítani, illetve a felületi megolvadt réteg szerkezetét leképezni.

A felületen lézersugaras kezelés után látható grafitüreg mérés kidolgozásával pedig sikerült egy olyan mérőszámot létrehozni, mellyel a hónolás és az azt követő lézersugaras kezelés együttes jóságát meg lehet ítélni.

Mindezek lehetővé teszik a motorblokkok futófelületének javítását és a termelési folyamatok optimalizálását illetve jó alapot képeznek további kutatások elvégzésére.

Bevezetés, a kutatások ipari háttere

A motorfejlesztést két fő faktor határozza meg. Az egyik fő hajtóerő az a vevői igény, hogy a belsőégésű motorok minél gazdaságosabbak legyenek, a másik fő faktort pedig az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások és a növekvő üzemanyagárak jelentik. 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 és a motorélettartam növelése [Lindner 2003].

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 alkatrész számára. A kopás csökkenti a motor 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 tehát növekvő károsanyag-kibocsátáshoz és csökkenő hatásfokhoz vezet [Lindner 2003].

Az egyre szigorodó európai károsanyag-kibocsátási normák betartása, a tribológiai tulajdonságok javítása és a motorélettartam növelése érdekében az egyik nagy európai gépjárműgyártó cég dízelmotorjainál és V-elrendezésű benzinmotorjainak 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 csökkenő olajfogyasztás, jó károsanyag-kibocsátás és hatásfok mellett. A lézeres kezelés hatására megnőtt a hengerfurat felület közeli rétegének keménysége, kopásállósága, továbbá a szövetszerkezetből adódóan olajtartó térfogat kialakítására került sor [Lindner 2003], [Herbst 2004].

Ezzel a felületkezeléssel már évek óta gyártanak motorblokkokat, de eddig csak a V-elrendezésű blokkok (kivéve a V8-as és V10-es Otto-motorok, mert azoknak alumíniumblokkja van) készültek így a szériagyártásban. Mivel a felületkezelést végző autógyár gyártókapacitás növelését tervezi, és emellett még több típust is kívánnak a jövőben lézersugarasan kezelni, ráadásul az eddig használt lézert más típusúra fogják cserélni a gyártósorban, ezért fontos a folyamatot befolyásoló tényezők pontosabb megértése.

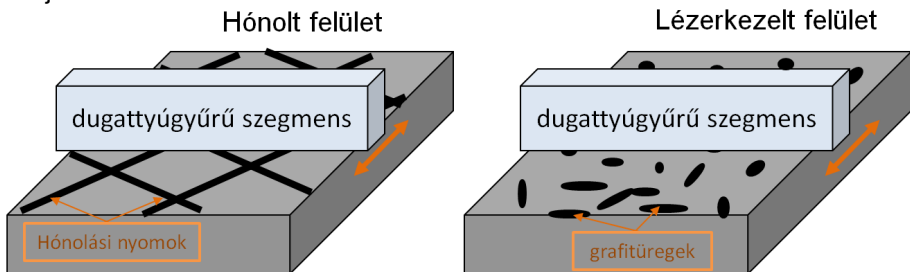
Tanszékünkön ugyan ennek a kutatásnak nem volt semmilyen előzménye, illetve az országban sem volt a kutatásnak publikált előzménye, viszont tanszékünk egyik fő profilja az anyagvizsgálat. Ezért és a hazai motorgyártás okán a felület tulajdonságainak részletesebb analitikai vizsgálatát is itt kívánták elvégezni, és a feladatot így a BME-n keresztül rám bízta.

Az öntöttvas motorblokkok futófelületének lézersugaras kezelése

A lézersugaras kezelések pozitív tulajdonságait kihasználva az egyik nagy európai gépjárműgyártó cég motorjainak hengerfuratán a hónolás után befejező megmunkálási lépésként lézersugaras kezelést végez.

A lézeres kezelés célja az anyag felső rétegének átolvasztása. Az olvasztással egyidejűleg a felületen lévő grafitlemezekből a lézersugár által gyújtott plazma kiégeti a grafitot, így gyakorlatilag ezek a „lyukak” (kiégetett grafithelyek) egymással nem kommunikáló olajtartó rendszerként funkcionálnak [Lindner 2003], [Herbst 2004/1], [Duffet 2003], [Queitsch 2004], [Herbst 2004/2], [Lindner 2006].

Ezt az eljárást a *DE 3922377C2*; és az *EP 1 738 859 A1* [Lindner 2006] jelű szabadalom védi. Ezek szerint a hengerek futófelületét hónolás után UV-tartományban működő lézersugárzásnak például excimer lézerekkel kell alávetni, hogy körülbelül a felső μm -es tartomány megolvadjon. A hónolás utáni karcokban (*1. ábra*) a dugattyúgyűrű még el tudja nyomni maga mellett az olajat, a lézersugaras kezelés után viszont a hónolási nyomok eltűnnek és a kiégetett illetve felnyitott grafitüregekben (*2. ábra*) tud megülni az olaj.



1. ábra Sematikus ábra a hónolás utáni felületről [Herbst 2004/2] alapján

2. ábra Sematikus ábra a lézersugaras kezelés utáni felületről [Herbst 2004/2] alapján

A berendezés lényege egy a furatokba vezethető optikai kicsatoló rendszer, mellyel a furatokra merőlegesen lehet a lézersugarat kivezetni. Az egység

3. Tézis [3] [4] [5]

XPS és EDS mérésekkel bizonyítottam, hogy GJL-250 jelű lemezgrafitos öntöttvas hónolt felületén lézersugaras kezelés hatására $15,8\text{-}30,4\text{ mJ/mm}^2$ lézer energiasűrűség tartományban, illetve $0,1129\text{-}1,1\text{ mJ}/(\text{mm}^2\text{ns})$ teljesítménysűrűség tartományban nitridált réteg nem, viszont oxidáció létrejön a vizsgált rétegben. Raman spektroszkópiás mérésekkel kimutattam továbbá, hogy a grafitlemezek környékén jól tapadó a plazmanyomás által felületre felvitt grafitréteg található, melyet DLC-ként és pirolitikus grafitként azonosítottam.

4. Tézis

EBSD mérésekkel bizonyítottam, hogy a GJL-250 jelű öntöttvas hónolt felületének 140 ns impulzushosszú Yb-szállézerrel, $30,4\text{ mJ/mm}^2$ energiasűrűséggel történő lézersugaras kezelése után a ferrit fázisra vonatkoztatva; a henger hossz tengelyével párhuzamos az [101] irány, és a hónolás (illetve a lézerkezelés) irányában [101] és [111] irányú egytengelyű textúra alakult ki.

5. Tézis [6] [7]

Végeselemes szimulációk alapján megállapítottam, hogy GJL-250 jelű öntöttvas felületének lézersugaras kezelésekor a vizsgált lézereknél $15,8\text{-}55,6\text{ mJ/mm}^2$ felületi lézer energiasűrűség tartományban, illetve $0,1129\text{-}1,3021\text{ mJ}/(\text{mm}^2\text{ns})$ teljesítménysűrűség tartományban a lézersugarasan megolvadt réteg alatt $3\text{-}8\text{ }\mu\text{m}$ mély tartomány van, amelyek hőmérséklete a lézersugaras kezelés során meghaladta az ausztenitesítési hőmérsékletet és kilágyult. Ezt a keménységmérések eredményei is alátámasztják, miszerint felület irányából mérve a megolvadt réteg vastagságához képest nagy behatolású (mikro- és mélységérzékeny) keménységméréseknél a lézersugarasan kezelt felületek lágyabbnak mutatkoztak, mint a hónolt felület – viszont a nanoindenteres felületi keménységmérésből kiderült, hogy $17,5\text{ mJ/mm}^2\text{ns}$ lézer teljesítménysűrűség felett a lézersugarasan kezelt felület a keményebb – ami csak úgy lehetséges, ha a felületi réteg alatt egy lágyabb tartomány van. FIB felvételeken megállapítottam továbbá, hogy a megolvadt felületi réteg vastagsága is a FEM szimulációval meghatározott tartományba esik.

Továbbá saját szimulációkkal vizsgáltam a gyártásban alkalmazható tartományokban a különböző lézertartományok hatását.

A motorblokkok hengerfuratainak mechanikus megmunkálásainál (fúrás, hónolás) a grafitlemezek egy részét betemeti a rákenődött alapanyag, más részük szabad marad. A lézersugaras kezeléskor ezeknek a lamelláknak egy része elpárolog és egy része szabaddá válik – a vékony ferritfelkondenzáció megolvad, és a felületi feszültség miatt a lamella két oldalán kis kitérkedéssé olvad össze –, ezekbe az üregekbe kerül bele az olaj a motor üzemelésekor. Ezért tehát nem mindegy, hogy a felületen lévő „betemetett” grafitkiválások hány százalékát tette szabaddá a lézerkezelés, és ezzel együtt mennyi grafitüreg fogja a súrlódási viszonyokat befolyásolni. Ennek meghatározására definiáltam a GK – lézersugaras kezelés utáni szabad grafitüreg arányt, és kidolgoztam annak mérési eljárását.

Új tudományos eredmények

A doktori kutatómunkám eredményeit összesen hat tézispontban foglaltam össze.

1. Tézis [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]

SEM, TEM és FIB mérésekkel igazoltam, hogy a GJL-250 jelű öntöttvas hónolt felületének lézersugaras kezelésekor a vizsgált lézereknél 15,8-55,6 mJ/mm² felületi lézer energiasűrűség tartományban, illetve 0,1129-1,3021 mJ/(mm²ns) teljesítménysűrűség tartományban réteges szerkezet alakul ki. A felület megolvad és ultrafinom szemcseméretű felületi réteg keletkezik, melynek vastagsága 0,5-2 µm között változik.

2. Tézis [5] [6]

Nanoindenteres mérésekkel bebizonyítottam, hogy azonos alapanyagánál GJL-250 jelű lemezgrafitos öntöttvas hónolt felületén lézersugaras kezelés hatására a kialakuló, megolvadt felületi réteg keménysége 140 ns impulzushosszú Yb-szálléznél a teljesítménysűrűség növekedésével a 0,1129-0,2173 mJ/(mm²ns) teljesítménysűrűség tartományban lineárisan nő.

forgatásával és fel-le mozgatásával a hengerfuratok teljes felületét lehet kezelni. a szabadalom magában foglalja még azokat a rendszereket is melyeknél a kicsatoló optika nem mozgatható, hanem az egész motorblokkot kell az optika körül forgatni. A berendezéshez a feltalálók 1,75-5 J/cm² energiatartományban működő lézert, szürkeöntvény blokkok kezeléséhez 308 nm hullámhosszúságút ajánlanak.

Szakirodalmi hivatkozások

- [Lindner 2003] *UV-Laserbelichtung von Grauguß - Zylinderlaufbahnen von Verbrennungskraftmaschinen*. Lindner, H, és mtsai. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2003., VDI-Berichte, 1764. kötet, old.: 73-96. ISSN 0083-5560
- [Herbst 2004/1] Herbst, L, és mtsai. Targeting diesel engine efficiency. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*. [Online] 2004. 10. 1. [Hivatkozva: 2007. 09. 15.] <http://www.optoiq.com/index/lasers-for-manufacturing/display/ils-article-display/214247/articles/industrial-laser-solutions/volume-19/issue-10/features/targeting-diesel-engine-efficiency.html>.
- [Duffet 2003] *Improvement in friction by cw Nd:YAG laser surface treatment on cast iron cylinder bore*. Duffet, G., Sallamand, P. és Vannes, A. B. hely nélk. : Elsevier, 2003., 205. kötet, old.: 289-296.
- [Queitsch 2004] Queitsch, Robert és Lindner, Horst Joachim. Deutscher Zukunftspreis. *Verschleiß- und ölverbrauchsarme Verbrennungsmotoren durch Werkstoffmodifikation von Zylinderlaufbahnen mit dem UV-Laser*. [Online] [Hivatkozva: 2008. 04. 15.] <http://www.deutscher-zukunftspreis.de/nominierter/verschlei%C3%9F-und-%C3%B6lverbrauchsarme-verbrennungsmotoren-durch-werkstoffmodifikation-von-zyli?sec=2>.
- [Herbst 2004/2] Herbst, Ludolf, Lindner, Horst és Hoult, Tony. An important novel application for excimer lasers in the automotive industry. [Online] [Hivatkozva: 2007. 12. 22.] <http://www.coherent.com/Downloads/ICAv2.pdf>.

[Lindner 2006] **Lindener, Horst.** *Vorrichtung zur Laser-Belichtung von Zylinderlaufbahnen von Kolbenmaschinen mit mehreren voneinander beabstandete, höhenverstellbare und um eine rotationsachse drehbare Optik-Einrichtungen; Verfahren zur Belichtung von Zylinderlaufbahnen von Kolbenmaschine. EP 1 738 859 A1 DE*

A kutatás célja

A szakirodalom áttekintése után világossá vált, hogy fémes szerkezeti anyagok felületi tulajdonságainak (például: keménység, kopásállóság, száraz és nedves súrlódási tulajdonságok) javítására rendkívül sokféle módszer ismeretes, ezek közül is talán a legdinamikusabban fejlődőek a lézersugaras kezelések. A különböző eljárások széles skáláján sok publikáció született az egyes eljárások tulajdonságairól, paramétereinek hatásáról, és a kezelt felületek tulajdonságairól.

A szakirodalom alapján egyértelműen kiderül, hogy az általunk vizsgált felületmódosító eljárás felületstrukturálásnak, felületszilárdításnak, felületátolvasztásnak és (amennyiben a levegőből a felületbe különböző gázok, vagy a felületen elhelyezkedő grafitlamellák beoldódnak) felületötvözésnek is tekinthető, egyre nagyobb felbontásban vizsgálva a felületi réteget.

A 15-55 mJ/mm² energiasűrűség tartományban elvégzett lézersugaras felületstrukturálásnál nem vizsgálták még a létrejövő szerkezetváltozást a vékony felületi rétegben. A klasszikus értelemben vett felületátolvasztásoknál a megolvadt réteg pedig legalább egy vagy két nagyságrenddel vastagabb. Szabad levegő atmoszférán végzett lézersugaras felületi nitridálásnál az 1-50 mJ/mm² az energiasűrűség tartományban csak tiszta fémekre gyakorolt hatásokat vizsgálták (nitrogén atmoszférában több acélfajtát is).

A szakirodalomban nem találtam az XeCl excimer lézerhez (a feltalálótól) kapcsolódó publikáción kívül a használt lézer energiasűrűség- (15-55 mJ/mm²) illetve teljesítménysűrűség-tartományban, ipari minták (perlitesez lemezgrafitos öntöttvas) technológiai (hónolt) felületén, szabad levegőatmoszférán végzett kísérleteknél, szilárdtest lézerekhez tartozó publikációt. Az irodalom alapján mindenképpen vékony réteg keletkezésére kell számítani, nem egyensúlyi lehűlés szerinti kristályosodással.

Mivel a motor futási tulajdonságait a motorblokk oldaláról (a furat formájától eltekintve) két fő faktor: a futófelület keménysége és a szabad grafitleme-

zek, azaz az olajtartó térfogatok határozzák meg, ezért célom kideríteni, hogy mik azok a paraméterek, amik a felületi minőséget befolyásolják, különös tekintettel a lézersugaras kezelésre. Célom volt tehát megállapítani, hogy:

- a lézersugaras kezelés milyen anyagszerkezeti változásokat eredményez,
- milyen mérőszámok alkalmasak a felületen kialakult réteg jellemzésére,
- a mérőszámok mely értékei adják az optimális eredményt különös tekintettel a felület keménységére illetve az olajtartó térfogat nagyságára,
- milyen az adott lézerparaméterek hatása a gyártásban alkalmazható tartományokban (saját szimulációk elvégzésével).

A vizsgált anyagok és vizsgálati módszerek

A lézersugaras kísérleteket EN 1561:1997 szabvány szerinti EN-JL1040 számú (EN-GJL-250 jelölésű) lemezgrafitos öntöttvason végeztem, mivel ilyen szürkeöntvényből készítenek legnagyobb darabszámban motorokat Magyarországon. A lézersugaras kísérleteket a motorblokk furatok hónolt felületén végeztem. A felületmódosítás tanulmányozására három fajta lézertípussal (XeCl excimer, Nd:YAG és Yb-szállézer) kezelt felületet vizsgáltam, különös tekintettel, a szállézerrel kezelt mintákra, mivel ilyen Yb-szállézerrel szerelnék fel egy új gyártósort is.

A futófelületen kialakult felületi réteget a felület irányából és keresztcsiszolaton annak szerkezetét különböző mikroszkópi technikákkal vizsgáltam. A megolvasztott rétegvastagságot pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM), transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) és fókuszált ionsugaras technikával (FIB) mértem meg. A felületen megolvadt réteg szerkezetét FIB-el vizsgáltam.

Az lézerkezelés előtti technológiai lépés (hónolás) és az azt követő lézersugaras kezelés hatását a felület közeli rétegekre különböző felbontású mikrokeménységmérő eljárásokkal vizsgáltam. A futófelületi réteg keménységét nanoindenteres mérésekkel határoztam meg.

A lézerkezelés hatására kialakult fázisokat röntgendiffrakcióval vizsgáltam. A felület összetételének és kémiai kötésiállapotának vizsgálatára röntgenfotoelektron-spektroszkópiás és energiadiszperzív röntgenspektroszkópiás méréseket végeztem.

A hónolás és az azt követő lézerkezelés hatását a felületközeli rétegek hatására visszaszórt elektrondiffrakcióval vizsgáltam.