



A felületmegmunkálás kialakításának hatása a lézeres felületedzés eredményességére

The Effect of Surface Machining Design on the Efficiency of Laser Surface Treatment

Mészáros Béla,¹ Fábíán Enikő Réka²

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, meszaros.bela@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag- és Gyártástudományi Intézet, Anyag Technológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Laser surface treatment is increasingly used for surface hardening. In this series of experiments we studied the milling groove design effect on laser hardened surfaces at 42CrMo4 steel after corresponding laser parameters. Milled grooves of 0.25 mm, 0.50 mm and 0.75 mm depth were studied. The used diode laser and its set parameters had the same focus distance in all cases; however, the power and travel speed of the laser light were changed according to the previously developed experimental plan. Higher laser heat input resulted in a deeper hardened zone. The 45° V-profile milling, and hence the 45° angles of incidence of the laser beam increased the thickness of the hardened layer. The deepest hardened layers were formed at the highest specific heat input and at the deepest grooves.

Keywords: 42CrMo4 steel, diode laser, laser surface heat treatment, milling groove design.

Összefoglalás

A lézeres felületkezeléseket egyre szélesebb körben alkalmazzák felületedzésekhez. A kísérletsorozatban három különböző, marással kialakított felület lézeres edzését végeztük 42CrMo4 acélon, diódalézerrel. 0,25 mm, 0,5 mm és 0,75 mm mélységű hornyok környezetét vizsgáltuk. A lézernyaláb fókusz távolsága állandó volt, azonban a lézerteljesítményt és a haladási sebességet az előzetesen kialakított kísérleti terv szerint változtattuk. A nagyobb lézerteljesítmény mélyebb edzett kérget eredményezett. A 45°-os V profil marások, és így a lézernyaláb 45°-os beesési szöge növelte az edződés mélységét. A legmélyebb hornyoknál és a legnagyobb fajlagos hőbevitel mellett alakult ki a legmélyebb edzett kéreg.

Kulcsszavak: 42CrMo4 acél, diódalézer, lézeres felületedzés, marással létrehozott horony.

1. Bevezetés

Napjainkban az iparban bevett szokásnak számít a szerkezeti anyagok, tengelyek felületi hőkezelése, a tartós, kopásálló felületek, élek kialakítása érdekében. Ezeknél a szerkezeteknél gyakori igény az olyan anyag alkalmazása, melynek szövetszerkezete magban szívósság, felülete pedig keménnyé, kopásállóvá alakítható valamilyen felületkezelési eljárással. A nemesíthető acéloknál korábban, egyedi gyártásra a lángedzést al-

kalmazták, míg nagy sorozatoknál az indukciós edzés volt a járható út vastagabb, kopásálló kéreg kialakítására. A lángedzés nem feltétlen hoz egyenletes vastagságú, felületi edzett kérget. Indukciós edzésnél ismert, hogy a kéregvastagság kialakulása az alkalmazott frekvencia mellett a termék felülete és az induktor közti légréstől is függ. A marással kialakított hornyok jellemzően olyan jellegűek, amelyekre nehéz egyenletes légrésszel kialakítani az induktort.

A lézeres felületkezelések alapelve, összehasonlítva bármely hőkezelő eljárással, ugyanaz, valamilyen hőbevitel hatására a szövetszerkezet megváltoztatása úgy, hogy ausztenites állapotba hevítjük a vasalapú fémet, majd gyors hűtés hatására a szövetszerkezet martenzites állapotba kerül [1, 2]. A lézerezés hatására a felületben kialakuló átédzett réteg vastagsága függ a munkadarab alapanyagától (ötözők hatása), a munkadarab felületi minőségétől, a felület kialakításától, a munkadarab méretétől (adott hőmenyisígre mekkora hőt képes elnyelni a darab), a felületre érkező nyaláb beesési szögétől, a haladási sebességtől, a lézerteljesítmény eloszlásától, a lézerfény hullámhosszától [3, 4]. A szakirodalomban előforduló példák alapján a 10 600 nm hullámhosszú CO₂-lézer reflexiója csiszolt, köszörült anyagoknál jellemzően meghaladja a 90%-ot, de a felület durvábbá tételével akár 20%-ra is csökkenthetjük [5, 6]. Szakirodalmi adatok szerint a felületi érdesség hatása a lézersugárzás abszorpciójára az egy nagyságrenddel kisebb hullámhosszon működő szilárdtest- és diódalézereknél nem oly jelentős, mint a CO₂-lézereknél [6, 7], ahogy azt az 1. táblázatban is láthatjuk.

1. táblázat. Az abszorpciós tényező változása különböző felületminőségek és lézerek alkalmazásakor [6]

Felület	Abszorpció, %	
	CO ₂ -lézer, 10 600 nm	Nd:YAG-lézer, 1064 nm
Polírozott	4	30
Csiszolt	5–7	33–37
Esztergált	6–8	36–43
Homokszórt	21–23	46–51
Oxidált	60–80	60–80
Grafitozott	70–80	70–80

Miközben azt látjuk, hogy az érdesebb felületnek jobb a sugárzásienergia-elnyelése, az olyan hagyományos érdességi értékek, mint Ra, Rq és Rz, nem alkalmasak egy fémfelület abszorpciós képességének közvetlen előrejelzésére. Szakirodalmi adatokból [8] ismerünk olyan példákat, amelyek hasonló érdességi értékek eltérő abszorpciós képességét mutatták. Bergström [9] a sugárzási energia elnyelését kifejező képesség leírására a felületi érdességi értékek helyett az ún. felületi profil átlagos meredekségének használatát javasolta.

Kügler [10] szerint a lézernyaláb energiája elnyelésének a felületi érdességtől való függése

változik a különböző anyagminőségeknél. Kügler úgy találta, hogy az ún. hibrid érdességi érték – amely az átlagos négyzetes meredekség, és ezért közel áll Bergström javaslatához – nem alkalmas az abszorpciós képesség előrejelzésére az 1.4301 rozsdamentes acélnál, illetve az 1.2344 anyagminőségű szerszámacélnál, míg rugóacél (1.1248) esetében van némi függés.

Az MSZ EN ISO 683-2:2018 szabvány szerinti 42CrMo4 (1.7225) acélminőséget az iparban széles körben alkalmazzák, mivel kiválóan megmunkálható és jól hőkezelhető. Króm- és molibdéntartalma miatt nagyobb igénybevételű gépkalkatrések jellemző anyaga. Az 50% martenzittartalmú, ideális átédzhető átmérő meghatározásához használt Grossmann-formula szerint [12, 13] belátható, hogy ezen acélminőségnél relatíve jó az átédzhető szelvényátmérő. A 42CrMo4 acél mechanikai tulajdonságai hőkezeléssel széles határok között változtathatók [13]. Dewi és társai [14] hasonló nemesíthető acélokon (38MnSiVS5 és 44MnSiVS6) tanulmányozták a lézernyaláb beesési szögének (10°, 20°, 30°) hatását. Úgy találták, hogy állandó sebességgel, de nagyobb beesési szögekkel pásztázva a felületet, nagyobb az edződési mélység, de ez anyagminőség-függő.

Joggal merül fel a kérdés, hogy miként befolyásolják a marással kialakított hornyok a felületi edzést. Kísérleteinkben arra voltunk kíváncsiak, hogy a 0,25 mm; 0,50 mm; 0,75 mm mélységig elkészített bemunkálások hogyan befolyásolják 42CrMo4, előnemesített állapotú acélnál a lézeres edzést, az edzett réteg vastagságát.

2. Kísérleti anyagok és módszerek

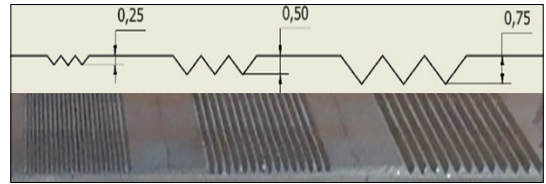
Az alapanyag Ø50×200 mm hosszú, melegen hengerelt, előnemesített állapotú, 305 HV₂ keménységű, 42CrMo4 minőségű acélrúd (C = 0,41%, Si = 0,3%, Mn = 0,7%, Cr = 1,1%, Mo = 0,2%) volt.

Célunk a kísérletek során az volt, hogy megvizsgáljuk a diódalézer által létrehozott edzett felület vastagságát különböző kialakítású felületeken. Előzetes irodalomkutatások alapján döntöttünk a V alakú hornyok kimunkálása mellett. Ezeknek a hornyoknak a kivitelezéséhez olyan szerszámmal volt szükségünk, amely megfelelő pontossággal és megfelelő mélységben képes kimunkálni a hőkezelni kívánt felületeinket. A megmunkálást marással végeztük. Az alkalmazott maró egy tömör, 90° főélelhelyezési szögű keményfém szármaróval (MC326-12.0W4L050C-WK40TF) történt, amely a főorsó döntésével és a szerszám kialakításának köszönhetően 90°-os szöget bezáró, V ala-

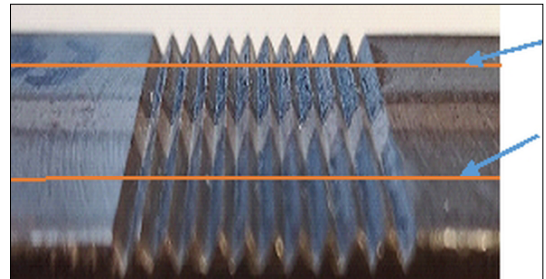
kú hornyokat hozott létre a felületen. A szerszám főbb paramétereit; $z=4$ fogsorszám, $D=\varnothing 12$ mm. A szerszámon alkalmazott bevonat TiAlN volt. A megmunkálási hornyoknál nem elhanyagolható, hogy a szerszámnak $R=0,5$ mm sarokrádiusza van, így marás során a „völgyekben” ennek megfelelő rádiuszok alakultak ki. Palástmarás esetén nem elhanyagolható az 50° -os horonyemelkedés-szög sem, de mivel a legnagyobb merülés $0,75$ mm, így ennek a paraméternek a forgácsolásra gyakorolt hatása elhanyagolható. Az alkalmazott forgácsolási paraméterek minden horony esetében azonos nagyságúak voltak, azonban meg kell jegyeznünk, hogy a szerszám tengelyvonala felé haladva a vágási sebesség közelít a nulla értékhez, de a hornyok maximálisan $0,75$ mm mélysége miatt ebben az esetben elhanyagolható a forgácsolási sebesség változása. A vágósebességet $V_c=32$ m/min és az előtolás értékét $f=74$ mm/min sebességre választottuk. A forgácsolási paramétereket a katalógusadatok alapján határoztuk meg. A jelen kísérlet legfontosabb eleme a fogásmélység, amely minden esetben megegyezett a hornyok mélységével. Ezek a fogásmélységek és egyben horonymélységek a következők voltak: $0,25$; $0,5$; $0,75$ mm (1. ábra). Fontos kiemelni, hogy a marási művelet során minden esetben MOL Emolin 505 típusú hűtő-kenő folyadékot alkalmaztunk, ezzel is csökkentve a felületekbe bevitt hő mennyiségét és az ezáltal kialakulandó szövetszerkezeti változásokat.

A felületek lézeres hőkezelését a Budai Benefit Kft. lézertechnológiai üzemében hajtottuk végre, 4 kW-os dióalézer alkalmazásával. Kísérleteinket három különböző technológiai adat-párosítással végeztük. Először 1200 W teljesítménnyel és 8 mm/s sebességgel, majd 1600 W teljesítményt alkalmaztunk, megőrizve a 8 mm/s haladási sebességet. A harmadik kísérletsorozatnál visszatértünk az 1200 W teljesítményhez, de csökkentettük a sebességet 5 mm/s-ra, azaz 150 Ws/mm, 200 Ws/mm és 240 Ws/mm egységnyi hosszra eső energiával hőkezeltük a mintafelületeket. A kísérletekhez 340 mm fókusztávolságot alkalmaztunk. Az egyes mintajelölésekhez tartozó technológiai adatok a 2. táblázatban láthatók.

A felületkezelt mintadarabot hőkezelt felületéhez közel, 10 mm vastagságban, hűtő-kenő folyadék alkalmazásával, szalagfűrészsel lefűrészeltük. Az így kapott lemezekből metallográfiai vizsgálatok érdekében, a hőkezelt pászmák középvonalában (2. ábra), 40 mm szélességű próbatesteket daraboltunk, úgy, hogy a minták tartalmazzanak a hornyolt részből és a sík felületből is értékelhető részt.



1. ábra. Az elkészített felületek vázlata és képe



2. ábra. Hőkezelési pászmák a $0,75$ mm mély hornyoknál. A nyílak mutatják a metallográfiai csiszolatok helyzetét

2. táblázat. Az egyes mintákhoz tartozó technológiai adatok

Beállított paraméterek	Minta sorszama és hozzá tartozó bemunkálási mélység		
	0,25 mm	0,5 mm	0,75 mm
1,2 kW → 8 mm/s	1	2	3
1,6 kW → 8 mm/s	4	5	6
1,2 kW → 5 mm/s	7	8	9

A mintákat hidegbeágyazás után több fokozatban csiszoltuk, políroztuk, majd Nital-2 marószerezrel marattuk, hogy láthatóvá tegyük az edzett-reteg-vastagságokat. A vizsgálatokat Olympus DSX1000 digitális fénymikroszkóp segítségével végeztük.

A minták keménységét, illetve keménységváltozását a felülettől a próbatest közepe felé Zwick 3212 típusú keménységmérő készüléken mértük, mind a sík felületre merőlegesen, mind a marással kialakított V alakú megmunkálási csúcsokból kiindulva. Ahhoz, hogy keménységváltozást tudjunk mérni, miközben betartjuk a lenyomatok közti előírt távolságokat [15], a terhelést $1,962$ N-ra terveztük.

3. Vizsgálati eredmények

A metallográfiai csiszolatokon azt tapasztaltuk, hogy még a legkisebb fajlagos energia esetén is a kialakított 45° -os, V alakú marási tartományok mélyebben edződtek, mint a sík felületek. Már a legkisebb egységnyi hosszra eső energiabevitel-

nél is szembevetendő, hogy azon felületnél, ahol a lézernyaláb beesési szöge a felülettel 45°-os szöget zár be (már az első horonynál is), mélyebb a hőkezelődött réteg, mint a sík felületeknél, ahol a lézernyaláb beesési szöge merőleges a felületre (3. ábra).

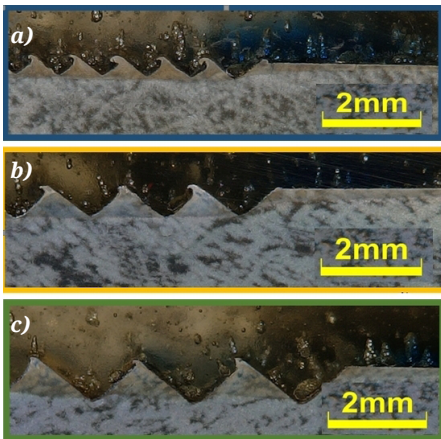
A metallográfiai csiszolatokkal összhangban a keménységváltozási görbék azt mutatják, hogy a V hornyok mélységével nőtt az edződött mélység a megmunkált részeken. Vizsgálataink azt mutatják, hogy a fogak teljes mélységében a keménység meghaladta a 700 HV_{0,2} keménységet (4. ábra).

Minél mélyebbek voltak a V bemetszésű hornyok, annál vastagabb az edződött réteg a marási csúcsoktól mérve.

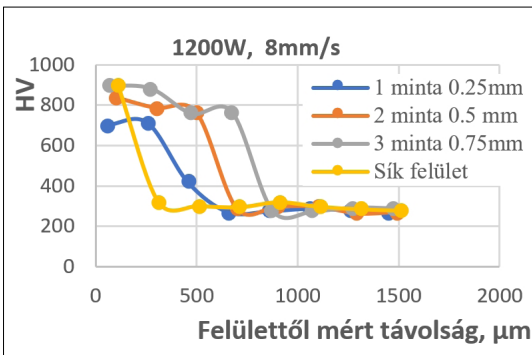
Már a keménységek alapján is feltételezhető, hogy a kéreg martenzites, de a nagyobb felbontásban végzett vizsgálatok egyértelműen bizonyítják. A felület közelében, illetve a marással kialakí-

tt csúcsoknál tűs martenzit alakult ki (5. ábra).

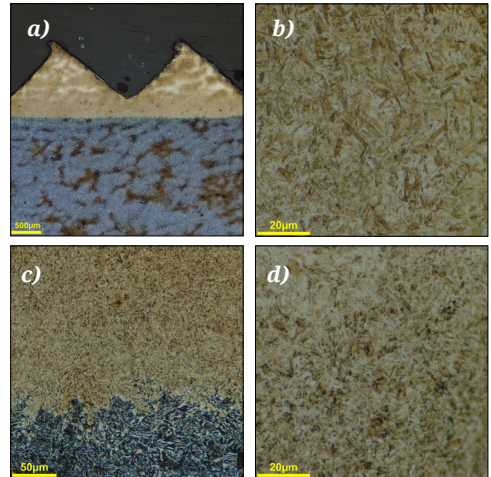
Növelve a lézernyaláb teljesítményét 1200 W-ról 1600 W-ra, és maradva a 8 mm/s haladási sebességénél, az edztkéreg-vastagság jelentősen nőtt; ez különösen igaz a hornyokkörnyezetében (6. ábra). Ebben az esetben, amikor a fajlagos energia 200 Ws/mm volt, a sík felületnél martenzit 350 μm mélységig volt kimutatható. A marással kialakított hornyolt felületeknél jelentősen megnőtt az edződési mélység.



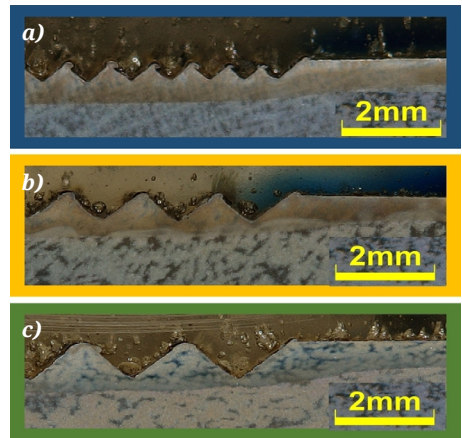
3. ábra. 150 Ws/mm-es fajlagos energiával végzett felületi hőkezelés megjelenése metszeten; a) 1-es, b) 2-es, c) 3-as minta



4. ábra. A keménység változása 150 Ws/mm hosszegységre eső energiával végzett hőkezelés után



5. ábra. Az edződött kéreg szövetszerkezete: a) marással kialakított, 0,75 mm-es hornyok, b) martenzit a megmunkálási csúcsoknál, c) átmeneti zóna, d) felülettől távoli, edződött kéreg



6. ábra. 1600 W-os teljesítménnyel és 8 mm/s sebességgel végzett lézeres hőkezelés hatása a hornyolt felületekre: a) 4-es minta, 0,25 mm-es hornyok, b) 5-ös minta, 0,5 mm-es hornyok, c) 6-os minta, 0,75 mm-es hornyok

A keménységmérési eredmények, összhangban a metallográfiai felvételekkel, azt mutatják, hogy az edződött kéreg vastagsága a 0,25 mm-es, illetve 0,5 mm-es hornyoknál nagyobb volt, mint 850 μm , míg a 0,75 mm mélységű horornál meghaladta az 1000 μm -t (7. ábra).

Az első mintacsoporthoz viszonyítva, tartva az 1200 W-os lézersugár teljesítményt és csökkentve a haladási sebességet 5 mm/s-re (240 Ws/mm fajlagos energiabevitel), még sík felületnél is elérte a 700 HV_{0,2} keménységűre edződött réteg vastagsága az 500 μm -t. A hornyok környezetében a martenzitesre edződött kéreg vastagsága a sík felülethez képest nőtt (8. ábra).

A 240 Ws/mm fajlagos energia alkalmazásakor tapasztaltuk a legnagyobb martenzitesre edződött kéregvastagságot, de a marással kialakított hornyoknál ez mindenütt nőtt. 1200 W-os lézeres teljesítmény és 5 mm/s haladási sebesség mellett a 0,25 mm-es hornyoknál az edződött kéreg vastagsa még nem érte el az 1 mm-t, de a 0,5 mm-mélységű hornyoknál a martenzites szövetszerkezet még 1100 μm mélységben is kimutatható volt, míg a 0,75 mm-es hornyoknál a keménység 1200 μm mélységben is meghaladta a 600 HV_{0,2}-t (9. ábra).

4. Következtetések

A lézeres felületi hőkezelés során az egységnyi felületre bevitt energia növelése növeli az edzési mélységet az előnemesített állapotú 42CrMo4 minőségű acélnál.

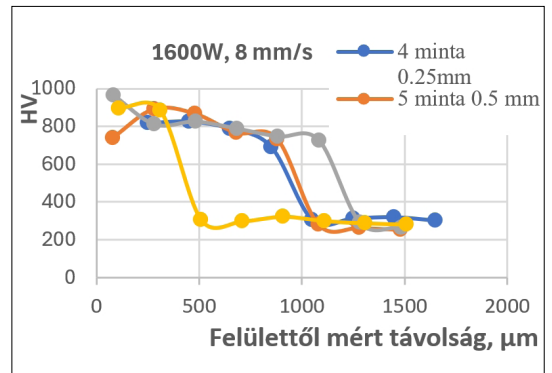
A sík felületek lézeres edzésekor a legvékonyabb a 700 HV_{0,2} keménységet meghaladó edződött réteg. A kísérletek során a legnagyobb (240 Ws/mm) egységnyi hosszra eső energia mellett érte el a 0,5 mm-t.

A 45°-os megmunkálás, s vele a lézernyaláb 45°-os beesési szöge befolyásolja a pálya mentén bevitt energia értékét, és így az edzés mélységét. Azonos nyalábteljesítmény mellett minél mélyebb volt a horony, annál mélyebben edződött az acél a hornyok környezetében.

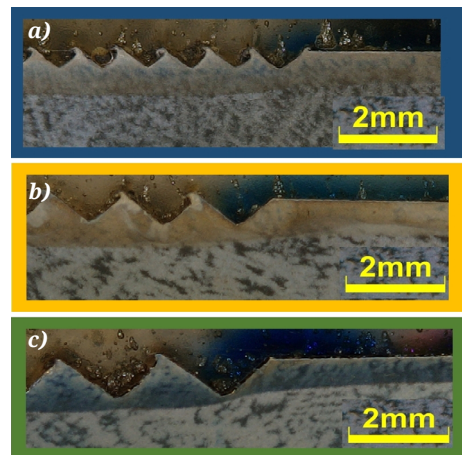
A 0,25 mm-es, a 0,5 mm-es és a 0,75 mm-es, marással kialakított, hornyolt felületek teljes mélységben edződtek már 150 Ws/mm-es egységnyi hosszra eső energia alkalmazásakor is.

Szakirodalmi hivatkozások

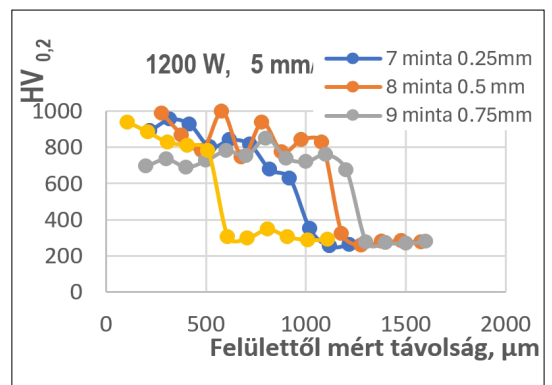
- [1] Bagyinszky Gy., Bitay E.: *Felületkezelés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2009. 41–45. <https://doi.org/10.36242/mtf-05>
- [2] Michał K., Jerzy M., Dominika P., Piotr W.: *Laser heat treatment of gas-nitrided layer produced on*



7. ábra. Keménységváltozások 200 Ws/mm egységnyi felületre jutó energiával végzett hőkezelés után



8. ábra. 240 Ws/mm fajlagos energiabevittel végzett felületi hőkezelés megjelenése metszeten, a) 7-es minta, 0,25 mm-es hornyok, b) 8-as minta, 0,5 mm-es hornyok c) 9-es minta, 0,75 mm-es hornyok



9. ábra. Keménységváltozás 240 Ws/mm fajlagos energiával végzett hőkezelés után

- 42CrMo4 steel. *Inzynieria Materralowa*, 2015. 301–305.
<https://doi.org/10.15199/28.2015.5.21>
- [3] Senthil Kumar P., Jegadheesan C., Somasundaram P., Praveen Kumar S., Vivek Anand A., Ajit Pal Singh, Jeyaprakash N.: *Review on laser surface hardening of alloy metals*. *Materials Today: Proceedings*, (2023) 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.259>
- [4] Kádas G., Fábíán E. R.: *Komplex felületi hőkezelések hatása szerkezeti acélok tulajdonságaira*. XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, Marosvásárhely, Románia, 2018.
- [5] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2007.
<https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [6] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I. Kézirat*. Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012.
- [7] <https://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/laser-marking-how-to-choose-the-best-laser-for-your-marking-application.html> (letöltve: 2024. január 25.)
- [8] Seibold G.: *Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung*. Herbert Utz Verlag, Munich, Germany, 2006; ISBN 3831606188.
- [9] Bergström D.: *The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces*. Ph.D. Thesis. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, February 2008.
- [10] Kügler H.: *Effects of Short-Term Laser Beam Heating on the Absorptivity of Steel Sheets*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3/2. (2019) 41.
<https://doi.org/10.3390/jmmp302004>
- [11] Cserjésné Sutyák Á., Szilágyiné Biró A.: *Acélok edzhetőségének becslése kémiai összetétel alapján*. *Gép*, 63/11. (2012).
- [12] Artinger I., Csikós G., Krállics Gy., Németh Á., Palotás B.: *Fémek és kerámiák technológiája*. Egyetemi jegyzet (45035). Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997.
- [13] MSZ EN ISO 683-2:2018 *Hőkezelhető acélok, ötvözött acélok és automataacélok*. 2. rész: Ötvözött nemesíthető acélok, 2018.
- [14] Dewi H. S., Volp J., Kaplan A. FH.: *Leaser beam absorbtion depending on the angle of incidence on groud surfaces*. *Laser in manufacturing conference, LIM*, 2019. 1–6.
- [15] MSZ EN ISO 6507-1:2024 *Fémek*. Vickers-ke-ménységmérés. Mérési eljárás, 2024.