



A lézeres felületedzésnek 1.2379 szerszámacél esetén különböző felületi kialakításokra gyakorolt hatása

Effect of Laser Surface Hardening on Different Surface Designs in the Case of 1.2379 Tool Steel

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- Gyártástudományi Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Laser surface treatments are increasingly used for the formation of hardened layers. In this experimental series, we examined surfaces machined to three different depths (0.25 mm, 0.5 mm, and 0.75 mm) to determine how these machining depths affect the thickness of the hardened layer. The base material was 1.2379 tool steel in all cases. The focal distance remained constant, while the laser power and scanning speed were varied according to the predefined experimental design. Our results indicate that higher specific power led to a deeper hardened layer. The 45° machining angle—and consequently, the 45° laser beam incidence angle—enhanced absorption and increased the hardening depth. The deepest grooves resulted in the thickest hardened layer. However, during our experiments, certain parameter settings raised the base material's temperature above the liquidus point, causing localized melting.

Keywords: tool steel, laser beam hardening, diode laser, surface texture.

Összefoglalás

A lézeres felületkezelési eljárásokat egyre szélesebb körben alkalmazzák edzett rétegek kialakítására. Jelen kísérletsorozatban három, különböző mélységben megmunkált felületet vizsgáltunk (0,25 mm, 0,5 mm és 0,75 mm) annak érdekében, hogy meghatározzuk, ezek a kiemelkedések és bemélyedések milyen hatással vannak az edzett réteg vastagságára. Az alapanyag minden esetben 1.2379-es szerszámacél volt. A fókusz távolságot állandó értéken tartottuk, míg a lézernyaláb teljesítményét és a pásztázási sebességet az előzetesen kidolgozott kísérletterv szerint változtattuk. A nagyobb fajlagos hőbevitel mélyebb edzett réteg kialakulását eredményezte. A 45°-os megmunkálás – és ezzel együtt a nyaláb 45°-os beesési szöge – növelte a hevített réteg vastagságát, valamint fokozta az edződés mélységét. A legmélyebb hornyok esetében alakult ki a legvastagabb edzett réteg. Néhány paraméterpárosítás a felülete közelében a hőmérsékletet a likvidusz hőmérséklet fölé emelte, így az anyag lokálisan megolvadt.

Kulcsszavak: szerszámacél, lézeres felületkezelés, diódlézer, felületi szerkezet.

1. Bevezetés

A diódlézeres hőkezelés egyre nagyobb szerepet kap az iparban a felületi keményítés terén, különösen az autóiparban, repülőgépiparban és szerszámgépiparban. Az eljárás alapelve az, hogy a lézernyaláb lokalizált hőbevitelt biztosít, amely

révén a munkadarab felületén végbemenő martenzites átalakulás növeli a kopásállóságot és az élettartamot.

Azonban a különböző topográfiájú anyagfelületek energiaelnyelése és -visszaverése jelentős hatással van az edzett réteg minőségére és mélységére. A lézersugárzás egy része elnyelődik a mun-

kadarab felületén, míg a fennmaradó hányad visszaverődik (reflexió), ami energiavesztéseget eredményez. A reflexió mértéke függ az alkalmazott sugárzás hullámhosszától és a munkadarab felületi érdességétől [1]. A nagy reflexió miatt a lézersugárzás egy része nem hasznosul, ami egyenlőtlen hőbevitelhez és inhomogén edzett réteghez vezethet. A probléma megoldására különböző ipari felületkezelési technikákat alkalmaznak:

- Felületi oxidáció: egy vékony oxidréteg (pl. hőkezeléssel vagy vegyi eljárással) csökkenti a visszaverődést, különösen polírozott felületeknél.
- Szórás vagy maratás: a durvább felületképzés növeli az elnyelt energiát és csökkenti a reflexiót.
- Grafit- vagy festékréteg alkalmazása: ezek az anyagok javítják az elnyelőképességet, és az iparban gyakran használják lézeres hegesztés és felületkezelés előtt [2].

Az egyes lézertípusok különböző hullámhosszon üzemelnek, és ezek a különböző működési tartományok megváltoztatják az anyagba bevitt hő mennyiségét, ezzel befolyásolva az edzett réteg vastagságát. Az 1. táblázat azt mutatja, hogy kétféle lézer esetén a különböző felületeknek mekkora az energiaelnyelő képessége, más néven abszorpciója százalékos arányban.

A CO₂-lézer infravörös tartományban működik (10,6 µm hullámhosszon), míg az YAG-lézer jellemzően a közeli infravörös tartományban üzemel (1,06 µm hullámhosszon). Ez a hullámhossz-különbség meghatározó szerepet játszik abban, hogy a különböző anyagok és felületi struktúrák milyen mértékben nyelik el a lézerfényt. A sima, polírozott felületek esetén az abszorpció általában kisebb, míg az érdesített vagy oxidált réteggel ellátott felületek hajlamosabbak nagyobb energiaelnyelésre. Az abszorpciós paramétereket tekintve a CO₂-lézer és az YAG-lézer eltérően viselkedik a különböző felületkezelések esetén. A polírozott felületek esetében mindkét lézertípusnál kicsi az abszorpció, de a YAG-lézer sugárzása valamivel jobban elnyelődik a fémekben, míg a CO₂-lézeré hajlamosabb visszaverődni. A csiszolt és esztergált felületek már nagyobb abszorpciót mutatnak, különösen a YAG-lézer esetén, mivel a finom érdesség segíti az energiaelnyelést. A szórt és oxidált felületek lényegesen jobb elnyelési képességgel bírnak mindkét lézernél, de itt is a YAG-lézer mutat nagyobb hatékonyságot. A grafitozott felületek kimagaslóan jó abszorpciót mutatnak mind a két lézertípus esetén [3].

1. táblázat. Az abszorpciós tényező változása különböző felületminőségek és lézerek alkalmazásakor [3]

Felület	Abszorpció, %
	Diódlézer, 700–1070 nm
Polírozott	30–40
Csiszolt	45–55
Esztergált	55–65
Homokszórt	75–85
Oxidált	85–95
Grafitozott	90–98

Az abszorpciós értékek alapján a YAG-lézer alkalmasabb a felületi edzésre, mivel a sugárzása jobban elnyelődik a különböző fém felületeken, különösen az oxidált, szórt és grafitozott rétegek esetében. A CO₂-lézer főként nemfémek anyagokhoz és nagyobb felületek hőkezeléséhez ideálisabb. A megfelelő lézertípus kiválasztása tehát kritikus szerepet játszik az optimális hőbevitel és az egyenletes edzési mélység elérésében.

A diódlézerek széles körben alkalmazott lézertípusok, amelyeket ipari megmunkálásokhoz, orvosi eszközökben és kommunikációs rendszerekben is használnak. Ezek a lézerek 700–1070 nm közötti hullámhosszon működnek, ami lehetővé teszi, hogy a sugárzás hatékonyan elnyelődjön különböző fémfelületeken, különösen, ha a felület oxidált vagy érdesített. E kísérletsorozatban diódlézert alkalmaztunk, aminek legfőbb előnyeként elmondható, hogy jól mobilizálható, egyszerű kezelésű és parametrizálható lézerről van szó. Ha megvizsgáljuk a diódlézerek különböző felületekre vonatkozó abszorpciós jellemzőit, akkor az 1. táblázatban látható, százalékban kifejezett eredményeket kapjuk.

Az 1.2379-es acél (AISI D2) hidegalakító szerszám-acél, amelynek keményítése kulcsfontosságú az élettartam és kopásállóság növelése érdekében. Diódlézernél végzett felületedzés során a keményített réteg vastagsága jellemzően 0,3–1,5 mm között változik a lézer teljesítményétől és a megmunkálási sebességtől függően [4]. Az edzett réteg vastagsága további tényezőktől is függ, úgy mint a nyaláb beesési szöge. Ez meghatározza az energiaelnyelést és a hőeloszlást. A 90°-os beesési szög biztosítja az optimális elnyelődést, míg a kisebb szögű (pl. 45°-os) sugárzás esetén a fény egy része „elpattan” a felületről, csökkentve az edzési hatékonyságot [5].

Egy kísérletben AISI 410 rozsdamentes acél diódalézeres felületi keményítést vizsgálták különböző beesési szögeknél, ahol a **2. táblázat**ban látható átédződött rétegvastagságok látszódnak a nyaláb beesési szögének megfelelően.

2. Anyagok, eszközök és technológiák

Az alapanyag Ø80 mm melegen hengerelt, előnemesített állapotú, HB 230–250 keménységű, 1.2379 (X153CrMoV12 vagy D2) szerszámacél rúd (1,53% C, 0,35% Si, 0,4% Mn, 12% Cr és 0,85% V) volt. A kísérletek érdekében 30 mm vastagságú szeleteket vágunk le, és az így nyert síkfelületeken terveztük a kísérleteket. Annak megállapítása érdekében, hogy miként befolyásolják a megmunkálási felületek a lézeres edzést, különböző felületi mélységű, V alakú hornyokat alakítottunk ki.

A mintadarabok felületének előkészítése egyetemes marógépen történt, ahol 0,25; 0,5 és 0,75 mm mélységű hornyokat martunk be (**1. ábra**). Az alkalmazott szerszám keménységű szármaró (MC326-12.0W4L050C-WK40TF) volt, amelynek főlelhelyezése 90°-os szögű. A főorsó döntésével és a szerszám kialakításának köszönhetően jöttek létre a „V” alakú hornyok, miközben megfelelő hűtő-kenő folyadékot alkalmaztunk. A marási folyamatok során a megfelelő hűtés és kenés biztosítása kulcsfontosságú volt a marás minőségének fenntartása érdekében.

A lézeres hőkezelést a Budai Benefit Kft. lézertechnológiai üzemében végeztük. A folyamat során 4 kW-os diódalézert alkalmaztunk, három különböző technológiai adatpárosítással.

Az eljárás célja az volt, hogy vizsgáljuk a különböző mélységű hornyok hatását a lézeres hőkezelésre és az anyag tulajdonságaira. A kísérletek eredményei segítenek meghatározni az optimális technológiai paramétereket az ipari alkalmazásokhoz. Az előzetes irodalomkutatások alapján [2, 6] 150, 200 és 240 Ws/mm fajlagos hőbevitellel pásztáztuk a mintafelületeket. A felületkezelés során a 340 mm fókusztávolságot használtuk a síkfelületekhez viszonyítva. Az egyes mintajelölésekhez tartozó technológiai adatokat a **3. táblázat**ban láthatjuk.

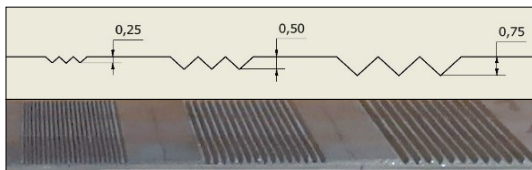
A felületkezelte mintadarabot hőkezelt felületektől, 10 mm távolságban, hűtő-kenő folyadék alkalmazásával, szalagfűrésszel lefűrészeltük (**2. ábra**). Az így kapott lemezekből metallográfiai vizsgálatok érdekében, a hőkezelt pásmák közepvonalaiban 40 mm szélességű csíkokat daraboltunk, úgy, hogy a minták tartalmazzanak a hornyolt részből és a sík felületből is értékelhető részegységet.

2. táblázat. Az edzett réteg vastagsága a lézernyaláb beesési szögének függvényében [2]

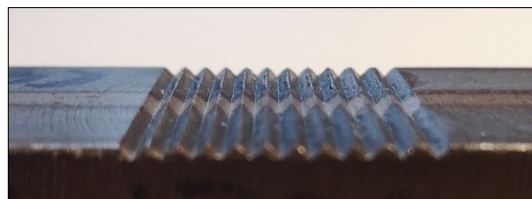
Beesési szög	Edzett réteg vastagsága (mm)
90°	1,2 mm
60°	0,8 mm
45°	0,5 mm

3. táblázat. Az egyes mintákhoz tartozó technológiai adatok

Beállított paraméterek	Minta sorszáma és a hozzá tartozó bemunkálási mélység		
	0,25 mm	0,5 mm	0,75 mm
1,2 kW → 8 mm/s	22	23	24
1,6 kW → 8 mm/s	25	26	27
1,2 kW → 5 mm/s	28	29	30



1. ábra. Az elkészített felületek vázlata és képe



2. ábra. 0,75 mm mély hornyok hőkezelés után

A mintákat hidegbeágyazás után több fokozatban csiszoltuk, políroztuk, majd Nital-2 marószerezrel marattuk, hogy láthatóvá tegyük a beedződött rétegvastagságokat. A fénymikroszkópos vizsgálatokat Olympus DSX1000 digitális fénymikroszkóp segítségével elemeztük.

A minták keménységét Zwick 3212 keménységmérő készüléken mértük mind a sík felületre mérőlegesen, mind a hornyok csúcsából kiindulva. Ahhoz, hogy keménységváltozást tudjunk mérni, miközben betartjuk a lenyomatok közti előírt távolságokat [7], a terhelést 1,962N-ra választottuk.

3. Vizsgálati eredmények

Következtetéseinket az elkészített csiszolatok mikroszkópos elemzéséből és a mintákon mért keménységfutasokból alkottuk meg.

Az előzetes irodalomkutatások [6], a metallográfiai vizsgálatok azt mutatják, hogy az edzett réteg vastagsága kisebb, mint a bemunkálásokkal elkészített felületnél. Megfigyelhető, hogy már a legkisebb fajlagos energia mellett is a kialakított, V alakú bemunkálásoknak az éles csúcsai és völgyei elvesztették alakjukat, és lekerekített formák kezdtek kirajzolódni (3. ábra). Az eredetileg kialakított formát piros vonal mutatja a 3. ábrán. Jelen kísérletsorozatunkban ez az a beállítás, ahol a legkevesebb hőt közöltük az alanyanyaggal.

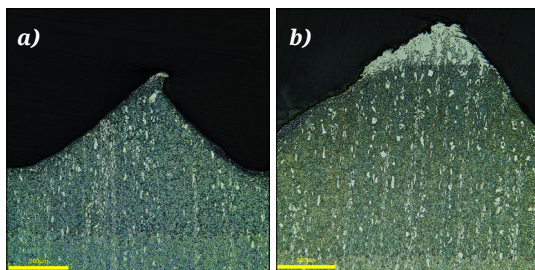
A keménységváltozás feltárása érdekében a keménységméréseket a síkfelületre merőlegesen, valamint a kialakított fogak élétől kiindulva végeztük. Az így kapott adatok alapján szerkesztettük meg a keménységváltozási diagramokat.

A legnagyobb keménységet jellemzően az edzett felületi rétegben mérhetjük, amely fokozatosan csökken a mag felé haladva. A legkisebb hőbevitellel végzett keménységmérési eredmények a 4. ábrán láthatók.

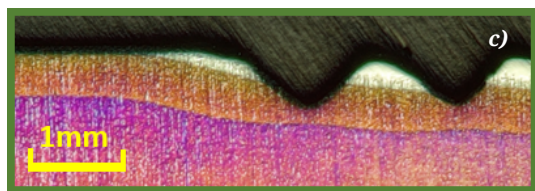
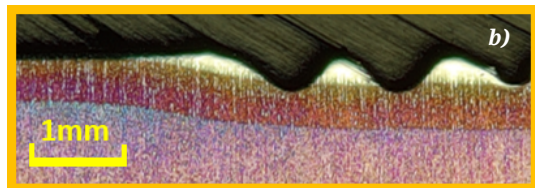
A keménységmérésekből az látszik, hogy a megmunkált csúcsonál az edződött réteg keménysége nagyobb, mint a síkfelület közelében elért keménység, ami arra utal, hogy nagyobb hőelnyelődés történik a megmunkált élénél, ami a primer ausztenit szemcseméretének növekedéséhez járulhatott hozzá. A keménységmérési ered-

ményekből (4. ábra) az is látszik, hogy a mélyebb hornyolósú mintadaraboknál, megmunkálási csúcsonál a felület közelében kisebb a keménység, mint 200 μm -re a felülettől, ami a szövetszerkezetben is megmutatkozik (5. ábra).

A kísérletsorozatunk következő beállításainál megnöveltük a lézer teljesítményét 1200 W-ról 1600 W-ra. A pásztázás sebességét konstans értéken tartottuk (8 mm/s). Ennek a beállításnak köszönhetően a fajlagos hőbevitel az előző beállításához képest növekedett (200 Ws/mm). A metallográfiai vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a megmunkálással kialakított csúcsok legömbölyödtek, megolvadtak. Kis nagyítás mellett a nitállal való maratást követően a megolvadt és újradermedt anyagrészek világosak (6. ábra).



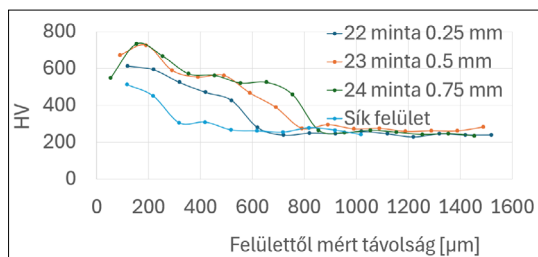
5. ábra. Megmunkálási csúcs környezete felületkezelés után: a) 22. minta b) 24. minta



6. ábra. 200 Ws/mm-es fajlagos nyalábenergiával végzett felületi hőkezelés megjelenése met-szeten: a) 25. jelű minta, b) 26. jelű minta, c) 27. jelű minta



3. ábra. 150 Ws/mm-es fajlagos hőbevitellel végzett felületi hőkezelés hatása a 22. mintánál



4. ábra. Keménységváltozás 150 Ws/mm-es fajlagos hőbevitellel végzett hőkezelés után

Nagyobb felbontás mellett a dendrites kristályosodás is jól megkülönböztethető (7. ábra). A megolvadt anyagrészek alatt két átmeneti tartományt is megkülönböztethetünk. A megolvadt zóna alatt található egy olyan tartomány, ahol a hőmérséklet a szolidus és az Ac_m közé került, ahol az eredeti karbidsoros szövetszerkezetben megindult a homogenizálódás, de a felületkezelési időtartam rövideje miatt nem lett homogén a szövetszerkezet. A 6. ábrán látható felvétel középső tartománya A1 és Ac_m közé hevült, majd a darab gyors hőelvonása miatt a karbidsorok közti rész martenzitesen alakult át. Ezt a megállapítást a 8. ábrán látható keménységmérési eredmények támasztják alá. A felülettől mérve 400–600 µm közötti mélységben az anyag keménysége elérte a 700–750 HV értéket a 0,5 mm és a 0,75 mm mélységű hornyolt területeken.

Az utolsó mérősorozatunknál az eredeti 1200 W teljesítményhez 5 mm/s pásztázási sebességet választottunk, ezért tovább növeltük a fajlagosan közölt hő mennyiségét, így a síkfelületet 240 Ws/mm sugárzás érte. Ebben az esetben is olyan hőmennyiséget közöltünk az alapanyag felületébe, ami a megmunkálási csúcsoknál azt megolvasztotta (9. ábra), ezáltal a kialakuló anyag keménysége ezeken a helyeken jelentősen kisebb lett, mint ott, ahol csak edződött a kéreg, ahogy azt a 10. ábra szemlélteti.

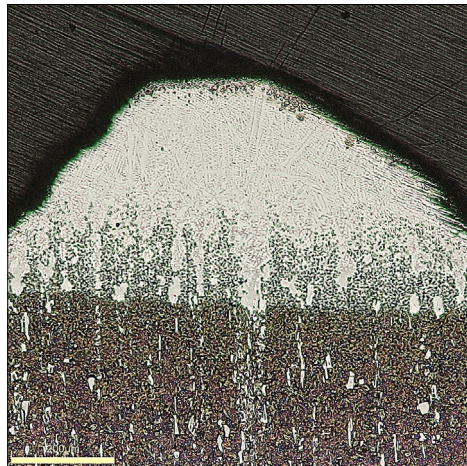
A keménységváltozási diagramokon látszik, hogy a felületközeli szakaszon a keménység 500 HV értékről indul, majd ahogy távolodunk a felszíntől, nagyobb keménységű edzett réteg (800 HV) keletkezik 450 µm mélységben (10. ábra).

A 9. ábrán jól látszik, hogy a közölt hőmennyiség hatására az éles sarkok megolvadtak, és teljesen eltorzult, lekerekedett formák jöttek létre a profilon.

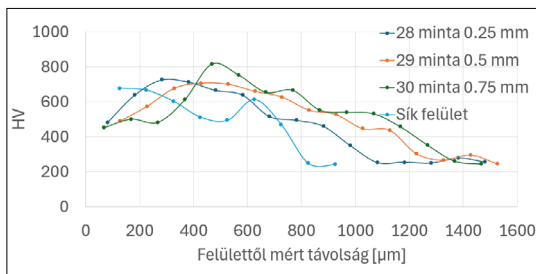
A nem megfelelően kiválasztott paraméterek az alapanyag hőkezelése során akár megolvadást okozhat, ami amellet, hogy a felületi keménység, kopásállóság nem lesz megfelelő, a megmunkálási élek is deformálódhatnak, ami egy hidegmegmunkáló szerszám esetén nemmegfelelőséghez járul.

4. Következtetések

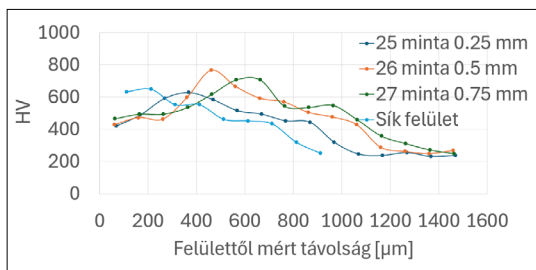
Lézeres edzési kísérleteink során három különböző beállítás mellett vizsgáltuk az 1.2379 hidegalakító szerszámacél viselkedését különböző felületi kialakítások mellett. Minden beállítás esetén a legmélyebb bemunkálás (0,75 mm) hozta a legmé-



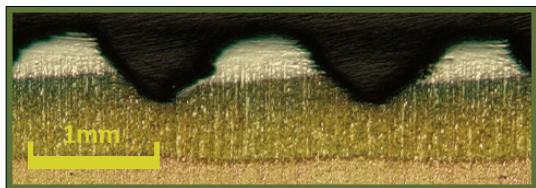
7. ábra. Megmunkálási csúcs környezete felületkezelés után: 26. számú minta



8. ábra. Keménységlefutások 200 Ws/mm-es fajlagos energiával végzett hőkezelés után



9. ábra. 240 Ws/mm fajlagos hőbevitellel végzett felületi hőkezelés megjelenése metszeten: 30. jelű minta



10. ábra. Keménységlefutások 240 Ws/mm-es fajlagos hőbevitellel végzett hőkezelés után

lyebb edződött réteget. A legvékonyabb edződött réteg minden esetben a síkfelületnél keletkezett. A 45°-os nyaláb beesési szöge nagyobb hőbevitelt eredményezett, mint a felületre merőlegesen eső lézertény.

Amennyiben a termék felületi kialakításai miatt a felület közelében akár csak lokálisan is megolvadt tartományok jöttek létre, azok dendritesen kristályosodtak, a keménység kisebb, mint ott, ahol csak hőkezelési martenzites szövetszerkezet jött létre.

Az 1.2379 anyagminőség diódlézeres hőkezeléséhez 1200 W-os teljesítmény és 8 mm/s-os pásztázási sebesség mellett 0,5 mm-es mélységű 45°-os megmunkálások még homogén edzett kéréget eredményeznek, ennél nagyobb energiabevitel mellett akár felületi olvadás is bekövetkezhet, különösen a karbidsorok környezetében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Henrikki P., Veli K.: *Diode laser beam absorption in laser transformation hardening of low alloy steels*. Journal of Laser Applications, 16/3. (2004) 147–153.
<https://doi.org/10.2351/1.1710879>
- [2] Moradi M., Arabi H., Jamshidi N., Benyounis K.: *A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser*. Optics & Laser Technology, 111. (2019) 347–357.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.013>
- [3] Buza G: *Lézersugaras technológiák I*. Kézirat. Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012.
- [4] Temmler A., Cortina M., Ross I., Küpper M. E., Rittinghaus S. K.: *Evolution of Surface Topography and Microstructure in Laser Polishing of Cold Work Steel 1.2379 (AISI D2) Using Quadratic, Top-Hat Shaped Intensity Distributions*. Materials, 15/3. (2022) 769.
<https://doi.org/10.3390/ma15030769>
- [5] Dewi H. S., Volp J., Kaplan A. F. H.: *Leaser beam absorbtion depending on the angle of incidence on groud surfaces*. Laser in manufacturing conference LIM 2019. 1–6. pdf.
- [6] Mészáros B., Fábíán E. R.: *The Effect of Surface Machining Design on the Efficiency of Laser Surface Treatment*. Acta Materialia Transylvanica, 7/2. (2024) 88–93.
<https://doi.org/10.33924/amt-2024-02-06>
- [7] MSZ EN ISO 6507-1:2024 Fémek. Vickers-keménységmérés. Mérési eljárás, 2024.