

# ANALIZA PARAMETROV LASERSKEGA KALJENJA NA ROBOTSKI CELICI

Matej Babič, Roman Šturm

## Izvelek:

Poznavanje integritete površinskega sloja izdelkov je pomembno pri aplikacijah, ki vključujejo trenje, mazanje in obrabo. Višja trdota površine izdelka direktno vpliva na manjšo obrabo te površine. Z ekonomskega vidika je velikokrat ceneje uporabiti poceni material, ki mu s površinskim kaljenjem dvignemo trdoto, kot uporabiti trdnejši in trši material, ki ne potrebuje dodatne površinske obdelave. Z laserskim kaljenjem lahko pri kovinskih materialih, kot je npr. jeklo, bistveno povečamo trdoto na površini. Prednosti laserskega kaljenja sta manjši vnos energije na enoto volumna v primerjavi s klasičnim kaljenjem in čistost postopka, saj pride do martenzitne transformacije s samokaljenjem. V članku bo predstavljena analiza procesnih parametrov laserskega kaljenja na robotski celici, pri čemer je bil celoten postopek krmiljen z optičnim pirometrom, ki je zasledoval temperaturo na površini obdelovanca. Pri raziskavi sta se spreminjali hitrost pomika laserskega snopa in temperatura na površini obdelovanca, meril pa se je potek trdote v globino.

## Ključne besede:

robotska celica, laser, mikrostruktura, trdota, kaljenje

## 1 Uvod

Lasersko kaljenje z robotsko celico je postopek površinske toplotne obdelave kovin, ki dopolnjuje običajne postopke plamenskega in indukcijskega kaljenja. Pri postopku robotskega laserskega kaljenja se laserski žarek z nastavljivo pozicijo goriščne točke vodi čez površino obdelovanca s pomočjo CNC krmiljenega večosnega sistema ali robota. Z merjenjem temperature v geometriji žarka je zagotovljen enakomeren dovod toplote na površino izdelka. Laserski žarek velike moči se uporablja za hitro in selektivno segrevanje kovinske površine, ki mu sledi samokaljenje, kar lahko ustvari zakaljeno strukturo do globine 1,5 mm in z vrednostmi trdote do 65 HRc. Vodenje laserskega žarka po površini obdelovanca je izvedeno naprej in nazaj z določenim zamikom po sistemu cik-cak, kar ustvarja lasersko sled na površini obdelovanca. Za doseganje večje globine utrjevanja – kaljenja – je potrebno imeti večje prostornine oz. mase obdelovanca, ker samo dovolj velika masa zagotavlja hitro odvajanje toplote in s tem kaljenje na večjih globinah. Martenzitna mikrostruktura površine jekla zagotavlja povečano trdnost in trdoto proti sredini materiala, kjer je mikrostruktura pretežno feritno-perlitna. Za samo lasersko kaljenje so potrebne sorazmerno majhne gostote moči. Postopek utrjevanja lahko vključuje obdelavo lokalnih ali pa tudi obsežnih površin ob-

delovanca. Zato je laserski žarek oblikovan tako, da obseva čim večje območje. Obsevano območje je običajno pravokotne oblike. Pri robotski laserski toplotni obdelavi se gibanje laserskega snopa po površini obdelovanca izvaja s pomočjo robota. Pri tem se laser uporablja kot vir toplote, ki hitro poviša temperaturo površine izdelka v avstenitno območje. Toplotno segrevanje površinske plasti, ki mu sledi hitro kaljenje, povzroči nastanek utrjene transformacijske plasti. S hitrim segrevanjem površine izdelka in nato ohlajevanjem, samokaljenjem, se spremeni mikrostruktura in s tem trdota površine. Površina materiala je po laserskem utrjevanju gladka, tako da ne potrebuje naknadnega postopka obdelave z brušenjem. Prednosti laserskega utrjevanja površine lahko na kratko strnemo: laser je vir energije z izjemnimi lastnostmi (brezkontaktna metoda, nadzorovan vnos energije, velika zmogljivost, stalen proces, natančno pozicioniranje), nižji stroški za dodatno obdelavo, brez uporabe hladilnih sredstev ali kemikalij, ohranjena velika žilavost izdelka, postopek je mogoče avtomatizirati in vključiti v proizvodni postopek, vrhunska odpornost proti obrabi tako utrjenih površin. Ena od prednosti uporabe laserjev v postopku toplotne obdelave je, da je mogoče toplotno obdelati selektivna območja površine, ne da bi bilo treba segrevati celotno površino. Ker je laser mogoče natančno nadzorovati, dimenzijsko in usmerjeno, je najučinkovitejši, če ga uporabimo za selektivno utrjevanje določenega območja, ne pa za segrevanje celotnega izdelka. Pri tem ni veliko deformacije materiala, saj vhodne energije na enoto volumna ni preveč. Robotska laserska tehnologija kaljenja je še posebej primerna za selektivno utrjevanje zapletenih oblikovanih delov, zobnikov, vrtin ali robov in aplikacij, pri katerih

**Doc. dr. Matej Babič**, prof. mat., Fakulteta za informacijske študije, Novo mesto;

**Prof. dr. Roman Šturm**, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1: Robotska laserska celica za kaljenje

je minimalni vnos toplote v okoliški material kritičen. Robotsko lasersko kaljenje se uporablja na železnih zlitinah, primernih za kaljenje, največkrat na jeklih z vsebnostjo ogljika več kot 0,2 mas. %, pa tudi na litem železu.

## 2 Eksperimentalno delo

Eksperimente laserskega kaljenja smo napravili na vzorcih malo legiranega orodnega jeklu 42CrMo4, oznaka po DIN standardu 1.7225. Kemijska sestava materiala (mas. %) je bila sledeča: 0,38–0,45 % C, maks. 0,4 % Si, 0,6–0,9 % Mn, maks. 0,025 % P, maks. 0,035 % S in 0,15–0,3 % Mo. Za vodenje laserskega snopa po površini obdelovanca smo uporabili robotsko lasersko celico RV60-40 (Reis Robotics Company) (slika 1). Maksimalna moč laserske celice je 3000 W. Kalili smo z močjo 1500 W. Izbrano jeklo smo z robotsko celico lasersko obdelovali z različnimi hitrostmi pomika in z različnimi kalilnimi temperaturami. Parameter hitrosti pomika laserskega

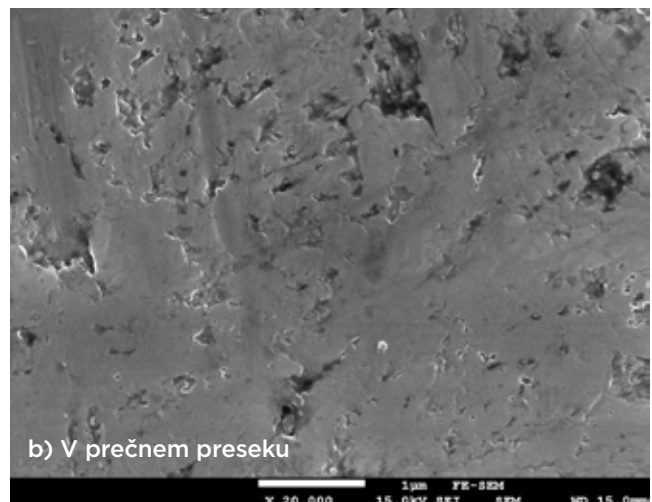
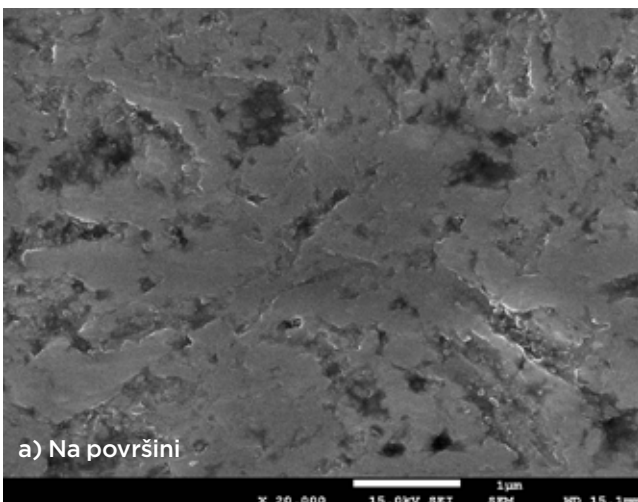


Slika 2: Robotsko lasersko kaljen vzorec s hitrostjo 2 mm/s in kalilno temperaturo 1000 °C

žarka smo spreminjali na intervalu  $v \in [2, 5] \text{ mm/s}$  s korakom 1 mm/s, parameter kalilne temperature pa na intervalu  $T \in [1000, 1400] \text{ °C}$  s korakom 100 °C. Makro posnetek lasersko kaljenih vzorcev je prikazan na sliki 2. Za vrednotenje dobljene mikrostrukture pod mikroskopom smo potem vsak vzorec prečno na laserske sledi prerežali, vstavili v bakelit, ga brusili, polirali in jedkali.

Poliranje in jedkanje je potekalo na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije (IMT). Naredili smo posnetke mikrostrukture površine in po preseku kaljenega območja. Slike smo naredili z rastrskim elektronskim mikroskopom SEM tipa JSM-7600F podjetja JEOL. Kaljena mikrostruktura v obeh primerih je videti primerljivo enako (slika 3).

Nas je zanimalo, kako se spreminja trdota martenzita v globino glede na različno določeno kalilno temperaturo na površini obdelovanca in na hitrost pomika laserskega žarka z robotsko celico. Posebej nas je zanimala mejna globina, ko še lahko go-



Slika 3: Kaljena mikrostruktura robotsko lasersko kaljenega vzorca

vorimo o kaljeni mikrostrukturi. To smo vrednotili z meritvami trdote v globino. Za meritve trdote smo uporabili obtežbo 0,1 kg. Mejno globino kaljenja smo določili na osnovi enačbe 1, ki določa trdoto 50 % deleža martenzita v mikrostrukturi, kar je meja v trdoti med kaljeno in nekaljeno mikrostrukturo. Enačba poda trdoto, merjeno po postopku Rockwell HRc, kjer % C predstavlja masni delež ogljika v jeklu. To trdoto potem s pomočjo primerjalne tabele pretvorimo v trdoto, merjeno po postopku Vickers HV.

$$H_{50\% \alpha'} = 44\sqrt{\text{mas. \% C}} + 14 \quad (1)$$

Za preiskovano jeklo predstavljajo trdote med 42-47 HRc (410-470 HV) spodnjo mejo, ko še govorimo o kaljeni mikrostrukturi.

### 3 Rezultati in diskusija

V tabeli 1 so predstavljeni parametri laserske obdelave z robotsko celico. Vzorce smo označili s P1-P20. Drugi stolpec v tabeli 1 predstavlja kalilno temperaturo, tretji stolpec pa hitrosti pomika laserskega snopa. Tabela 2 prikazuje meritve trdote za različne parametre hitrosti in temperature laserskega kaljenja na različnih globinah. V zakaljenem sloju se gibljejo trdote med 410 in 1000 HV 0.1. Z rdečo barvo so označene meritve trdote, kjer material ni več zakaljen oz. mikrostruktura vsebuje manj kot 50

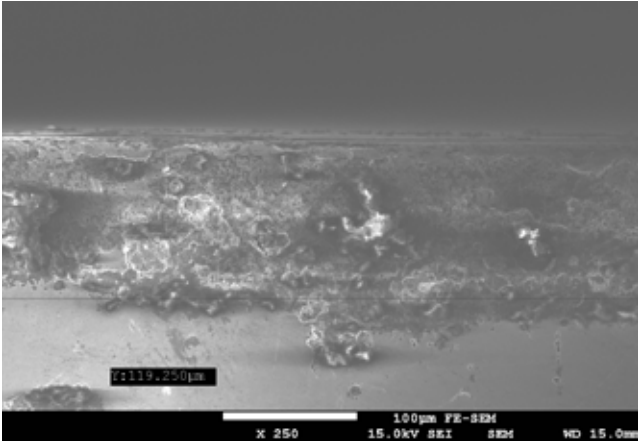
% martenzita. Iz tabele lahko takoj ugotovimo, da prihaja do nepričakovanih rezultatov pri različnih

Tabela 1 : Parametri laserske obdelave z robotsko celico

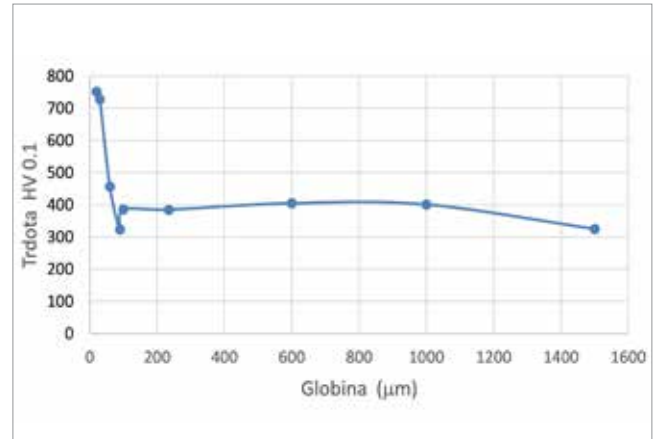
Vzorec	Temperatura (°C)	Hitrost (mm/s)
P1	1000	2,0
P2	1000	3,0
P3	1000	4,0
P4	1000	5,0
P5	1100	2,0
P6	1100	3,0
P7	1100	4,0
P8	1100	5,0
P9	1200	2,0
P10	1200	3,0
P11	1200	4,0
P12	1200	5,0
P13	1300	2,0
P14	1300	3,0
P15	1300	4,0
P16	1300	5,0
P17	1400	2,0
P18	1400	3,0
P19	1400	4,0
P20	1400	5,0

Tabela 2 : Meritve trdote na različnih globinah

Vzorec	Trdota HV 0.1 na globini								
	20 μm	30 μm	60 μm	90 μm	100 μm	235 μm	600 μm	1000 μm	1500 μm
P1	697	679	670	638	693	661	634	550	312
P2	720	704	705	686	694	693	672	520	309
P3	621	613	609	619	612	602	615	501	306
P4	706	706	708	719	747	755	624	490	302
P5	801	729	728	602	639	614	632	560	320
P6	660	738	723	657	772	647	633	534	315
P7	712	625	599	602	595	612	614	510	317
P8	642	611	605	603	620	659	633	495	306
P9	752	728	457	324	386	385	405	401	325
P10	927	874	801	876	818	376	360	350	319
P11	685	770	719	731	737	711	605	550	320
P12	990	915	763	388	338	309	346	330	312
P13	755	791	731	719	712	691	716	550	326
P14	997	979	970	938	993	961	934	580	319
P15	692	740	721	748	746	712	662	532	318
P16	650	704	691	738	702	651	601	482	309
P17	905	810	866	708	793	883	881	650	350
P18	855	829	865	898	924	997	820	623	336
P19	810	778	709	760	658	617	505	450	320
P20	852	810	826	347	308	330	315	302	292



a) Optična meja, SEM

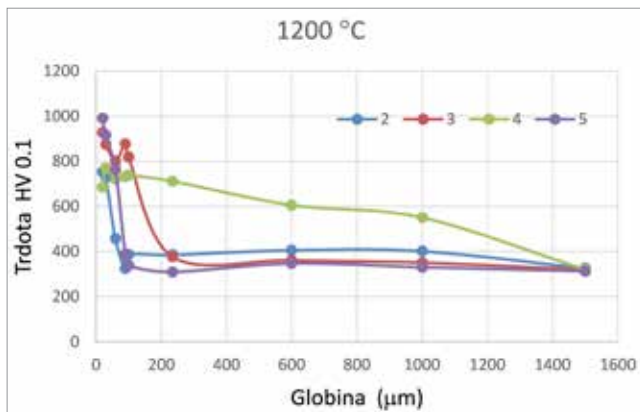


b) Meritve trdote od površine v globino

Slika 4 : Prečni presek kaljene površine ( $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 2\text{ mm/s}$ )

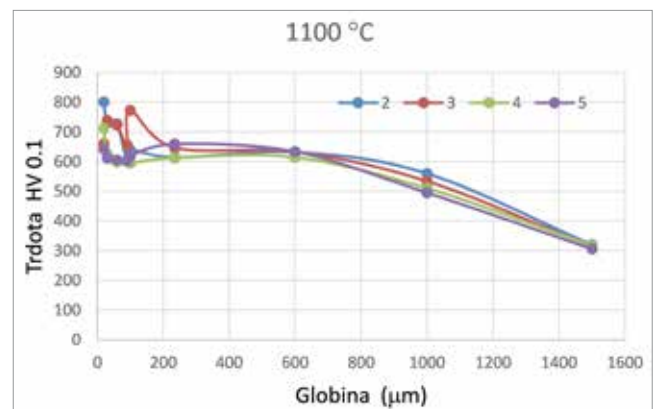
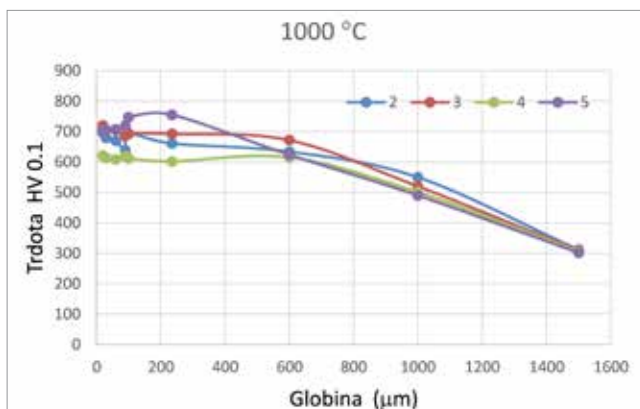
pogojih laserske obdelave. Na *sliki 4a* je lepo vidna optična meja med kaljenim materialom – martenzitom – in osnovnim nekaljenim materialom, ki je na globini okrog  $120\text{ }\mu\text{m}$ . Kakšna pa je resnično prava globina, da lahko govorimo o zakaljenem materialu, pa povedo meritve trdote v globino. V tem primeru je zakaljena globina okrog  $60\text{ }\mu\text{m}$ , kar je vidno na *sliki 4b*. Na *sliki 5* so prikazani še poteki trdote

v globino v primeru vseh različnih hitrosti pomika laserskega snopa in pri  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jasno se vidi, da je nekaj narobe, ko povežemo pričakovane rezultate meritev trdote z obdelovalnimi parametri. Največjo globino kaljenja dosežemo pri hitrosti pomika  $4\text{ mm/s}$ , ki ni ne najvišja in ne najnižja hitrost obdelave.



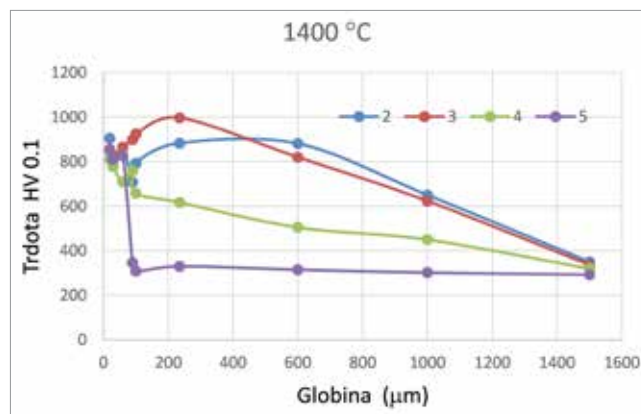
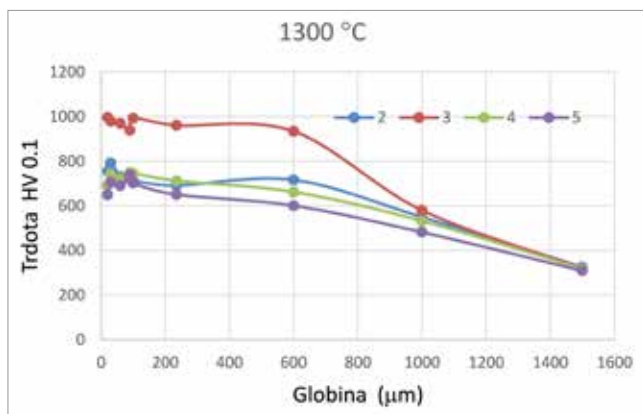
Slika 5 : Potek trdote pri različnih hitrostih pomika laserskega snopa,  $T$  (na površini) =  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Na *sliki 6* so prikazani dobri poteki trdote v globino, saj materialu zvezno pada trdota v globino pri določeni temperaturi kaljenja ( $1000\text{ in }1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in pri vseh izbranih hitrostih pomika med  $2\text{ in }5\text{ mm/s}$ . Najvišje trdote v površinskem sloju se gibljejo med  $600\text{--}700\text{ HV }0.1$ . Pri vseh obdelovalnih pogojih so dosežene globine kaljenja okrog  $1,2\text{ mm}$ . Na *sliki 7* je v primeru hitrosti pomika laserskega snopa največja dosežena trdota na nivoju  $1000\text{ HV }0.1$ , pri vseh ostalih parametrih pa okrog  $700\text{ HV }0.1$ . Globina kaljenja je pri vseh izbranih hitrostih pomika laserskega snopa na nivoju  $1,2\text{ mm}$ . Ko pa pogledamo krivulje poteka trdote v globino pri kalilni temperaturi  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lahko ugotovimo, da je pri hitrostih pomika  $2\text{ ali }3\text{ mm/s}$  oblika krivulje podobna predhodnim opisom. Pri višjih hitrostih pomika ( $4\text{ in }5\text{ mm/s}$ ) pa trdota hitro pade od površine v globino na nivo trdote osnovnega materiala.

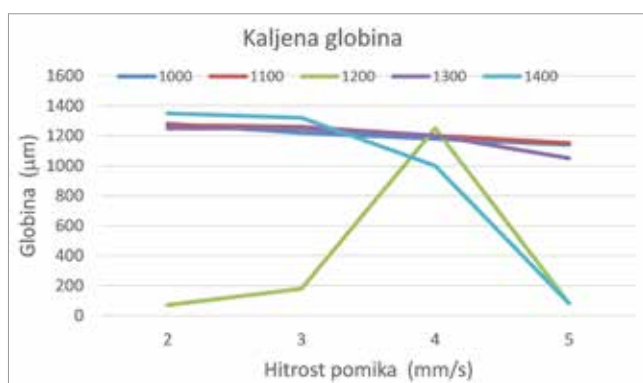


Slika 6 : Potek trdote v globino pri temperaturah kaljenja  $1000\text{ in }1100\text{ }^{\circ}\text{C}$





Slika 7: Potek trdote v globino pri temperaturah kaljenja 1300 in 1400 °C



Slika 8: Dosežena globina kaljenja pri različnih obdelovalnih parametrih

Na *sliki 8* je prikazana še dosežena globina kaljenja pri različnih obdelovalnih parametrih. Iz grafa lahko jasno zaključimo, da določen parameter obdelave ne daje zanesljivih podatkov. Kot smo ugotovili že prej, je največje odstopanje dosežene globine kaljenja pri kalilni temperaturi 1200 °C glede na hitrost pomika laserskega snopa. Enako se v primeru kaljenja na temperaturi 1400 °C največja dosežena globina kaljenja začne hitro zmanjševati s povečevanjem hitrosti pomika laserskega snopa. Na osnovi tega grafa lahko zaključimo, da optični pirometer ne daje zanesljivih podatkov o temperaturi na površini obdelovanca. Če pirometer zazna višjo temperaturo, kot je v resnici, laserski izvor emitira nižjo gostoto energije. Posledično se segreje manjša globina jekla v avstenitno območje in zato so tudi dosežene globine kaljenja manjše.

## 4 Zaključek

Glavni cilj laserskega kaljenja materialov s pomočjo robotske celice je poleg povečanja površinske trdote in zagotovitve odpornosti delov proti obrabi, da zagotovimo učinkovit in natančen postopek s kontroliranimi rezultati kaljenja. Trdota ma-

teriala je pomembna mehanska lastnost, ki vpliva tudi na trdnost materialov. Z robotskim laserskim kaljenjem želimo dosežati visoke površinske trdote in povišane trdote v primerni globini. S tem zmanjšamo koeficienta trenja in povečamo nosilne sposobnosti površinskih slojev. V prispevku smo predstavili, kako parametri robotske laserske celice, temperatura in hitrost, vplivajo na trdoto v globino kaljenega materiala. Pri tem pa lahko ugotovimo, da brez predhodno opravljenih eksperimentov za vrednotenje učinkov parametrov laserskega procesa na doseženo trdoto na določeni globini ne smemo slepo zaupati »in-situ« merilnim instrumentom, ki krmilijo proces laserskega kaljenja.

## Viri

- [1] J. Grum, P. Žerovnik, R. Šturm: Measurement and Analysis of Residual Stresses after Laser Hardening and Laser Surface Melt Hardening on Flat Specimens; Proceedings of the Conference "Quenching '96", Ohio, Cleveland, 1996.
- [2] D. Steiner Petrovič, R. Šturm: Fine-structured morphology of a silicon steel sheet after laser surface alloying of Sb powder. *Strojniški vestnik*, jan. 2014, vol. 60, no. 1, pp. 5-11.
- [3] D. Bucevac, B. Matovic, B. Babic, V. Krstic: Effect of post-sintering heat treatment on mechanical properties and microstructure of SiC-TiB 2 composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2014; 528(4): 2034-2041.
- [4] J. D. Kim, M. H. Lee, S. J. Lee, W. J. Kang: Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, Vol. 19, Issue 4, p. 941-945.
- [5] J. C. Ion et al.: *Laser processing of engineering materials*, Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford, UK, 2005, p. 221-224.

- [6] S. Martínez, A. Lamikiz, I. Tabernero, E. Ukar: Laser Hardening Process with 2D Scanning Optics, *Physics Procedia*, 2012, Vol. 39, p. 309–317.
- [7] L. Orazi, A. Fortunato, G. Cuccolini, G. Tani: An efficient model for laser surface hardening of hypo eutectoid steels, *Applied Surface Science*, 2010, Vol 256, Issue 6, p. 1913–1919.
- [8] T. Didenko, “Laser surface melting – modelling and experimental verification of the melted zone shape and size, and chemical homogeneity”, PhD Thesis, AGH University of Science and Technology, Kraków, 2006 (in Polish).
- [9] T. Didenko, J. Kusinski and G. Kusinski, “Multiphase model of heat and mass transport during laser alloying of iron with electrodeposited chromium layer”, *Proc. Multiscale and Functionally Graded Materials Conf. 1*, 640–646 (2006).
- [10] L. A. Dobrzanski, M. Bonek, E. Hajduczek and A. Klimpel, “Alloying the X40CrMoV5-1 steel surface layer with tungsten carbide by the use of a high power diode laser”, *Applied Surface Science* 247, 328–332 (2005).
- [11] J. M. Lackner, W. Waldhauser, A. Alamanou, Chr. Teichert, F. Schmied, L. Major and B. Major: “Mechanisms for selfassembling topography formation in low-temperature vacuum deposition of inorganic coatings on polymer surfaces”, *Bull. Pol. Ac.: Tech.* 58, 281–294 (2010).
- [12] T. Burakowski, W. Napadłęk, A. Wozniak and I. Kalman: “Experimental determination of the effect of density of power laser  $\lambda = 1064$  nm on the effectiveness of laser steel one pulse texturing 41Cr4”, *Proc. Electrotechnical Institute 256*, 7–21 (2012) (in Polish).
- [13] M. Rozmus-Gornikowska, J. Kusinski, and M. Blicharski: “The influence of the laser treatment on microstructure of the surface layer of an (X5CrNi18-10) austenitic stainless steel”, *Archives of Metallurgy* 56 (3), 717–721 (2011).
- [14] Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren, H. B. Yao and H. X. Yao, “Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy”, *Materials and Design* 30 (5), 1697–1703 (2009).

## Analysis parameters of laser hardening on robot cell

### Abstract:

Characterization of the surface topography of materials is important in applications involving friction, lubrication, and wear. The essential feature is the hardness of materials. Hardness is a measure of the resistance to localized plastic deformation caused by mechanical indentation or abrasion. However, the hardness of the materials can be increased by a heat treatment-tempering process. We will present robotic laser quenching, which, contrary to known heat-curing processes, high-frequency quenching, electrical heating, melt quenching, and other methods, is not a mass quenching process but a surface process. The article presents the influence of the speed and temperature parameter of a robot laser cell on the material hardness depth.

### Keywords:

robot-cell, laser, microstructure, hardness, hardening

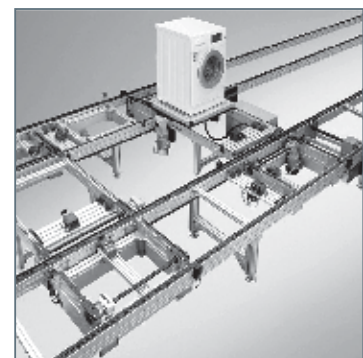
# Rexroth

## ORGATEX®

### LEANPRODUCTS®



## BOSCH



# OPL

automation

OPL avtomatizacija, d.o.o.  
Dobrave 2  
SI-1236 Trzin, Slovenija

Tel. +386 (0) 1 560 22 40  
Tel. +386 (0) 1 560 22 41  
Mobil. +386 (0) 41 667 999  
E-mail: info@opl.si  
www.opl.si