

# Surface roughness characterization of stainless steel after laser assisted machining

## Ocena parametrów chropowatości powierzchni po laserowym wspomaganie skrawania stali nierdzewnej

AGATA FELUSIAK  
MARTYNA WICIAK-PIKUŁA  
TADEUSZ CHWALCZUK  
PIOTR KIERUJ  
PAWEŁ TWARDOWSKI \*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.113>

The paper presents the analysis of the influence of laser assisted machining (LAM) on various parameters of surface roughness of stainless steel. The tests were carried out for cemented carbide inserts with varying cutting parameters. In most cases, a significant reduction in the roughness parameters was observed using LAM.

**KEYWORDS:** stainless steel, laser assisted machining, turning, surface roughness

Przedstawiono analizę wpływu laserowego wspomaganie skrawania (LAM) na różne parametry chropowatości powierzchni stali nierdzewnej. Badaniom przy zmiennych parametrach skrawania poddano płytki wykonane z węgla spiekane. W większości przypadków zauważono wyraźne zmniejszenie wartości parametrów chropowatości po zastosowaniu LAM.

**SŁOWA KLUCZOWE:** stal nierdzewna, wspomaganie laserowe LAM, toczenie, chropowatość powierzchni

### Wprowadzenie

Mimo że stal nierdzewna jest szeroko stosowana, jej obróbka nadal wiąże się z pewnymi problemami. Ze względu na niską przewodność cieplną (w porównaniu ze stalami konstrukcyjnymi), a także tendencję do umocnienia podczas obróbki i tworzenie wiązań adhezyjnych z materiałem narzędzia stale nierdzewne austenityczne są zaliczane do materiałów trudnoskrawalnych. Niska przewodność cieplna powoduje występowanie wysokiej temperatury w strefie skrawania, co przyczynia się skrócenia trwałości ostrza skrawającego [1].

Stal austenityczna X2CrNiMo17-12-2 ma bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle, np. spożywczym i chemicznym (wykonuje się z niej m.in. zbiorniki, rury, narzędzia chirurgiczne), w jubilerstwie, a także jako materiał na elementy konstrukcji statków lub pojazdów.

Ważną kwestią w przypadku obróbki materiałów (nie tylko stali nierdzewnych, ale dowolnego materiału konstrukcyjnego) jest wytworzenie warstwy wierzchniej o odpowiedniej jakości. Struktura geometryczna powierzchni jest istotna zwłaszcza ze względu na właściwości użytkowe, takie jak opory przepływu, wytrzymałość zmęczeniowa czy szczelność połączeń [2].

W celu poprawy skrawalności materiałów trudnoobrabialnych stosuje się metody obróbki hybrydowej, np. laserowe wspomaganie skrawania (LAM). Wspomaganie laserowe polega na podgrzaniu obrabianego materiału – w celu jego zmiękczenia – wiązką lasera o dużej mocy, co skutkuje zmniejszeniem sił skrawania oraz wytrzymałości materiału podczas skrawania [3]. Technologia LAM jest często stosowana po to, aby ułatwić obróbkę materiałów trudnoskrawalnych – stopów niklu [4, 5], stopów tytanu [6] lub stali nierdzewnych [7–11].

W przywołanych pracach wskazano na pozytywne skutki zastosowania laserowego wspomaganie skrawania, takie jak: zmniejszenie sił oporu podczas skrawania, poprawa jakości obrobionej powierzchni oraz wydłużenie trwałości ostrzy skrawających.

W pracy [4] autorzy potwierdzili możliwość obniżenia parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni o ponad 50% w porównaniu z tradycyjnym toczeniem – dzięki zastosowaniu laserowego wspomaganie. Ponadto badacze zauważyli, że przyjęta strategia obróbki ma duży wpływ na mikrotrwałość obrobionej powierzchni.

W artykule [5] zauważono, że skutkiem użycia lasera o nadmiernej mocy jest zbyt intensywne uplastycznienie obrabianego materiału i pogorszenie jakości powierzchni.

Według pracy [7] laserowe wspomaganie frezowania martenzytycznej stali nierdzewnej pozwala nawet na dwukrotne zmniejszenie zużycia ostrzy w porównaniu z obróbką konwencjonalną (w badaniach użyto płytek ze spiekane węgla wolframu), przy czym nie wpływa ono na zmianę charakteru zużycia – zarówno w obróbce tradycyjnej, jak i w obróbce ze wspomaganie laserowym dominowało zużycie adhezyjne oraz ściernie. Badacze stwierdzili również spadek wartości sił skrawania o ok. 1/3.

W artykule [8] autorzy dowodzą, że przy nagrzewaniu laserowym próbek ze stali austenitycznej w miejscu przetopienia powstaje struktura dendrytyczna, która jest łatwiejsza do obróbki, nie zmienia się natomiast mikrotrwałość strefy przetopionej w porównaniu ze strefą nieprzetopioną. Na głębokość przetopienia duży wpływ miała powłoka absorpcyjna (gwasz), którą został pokryty obrabiany przedmiot. W próbkach z warstwą absorpcyjną głębokość przetopienia była większa niż w próbkach bez pokrycia, mimo że w testach stosowano identyczną moc wiązki lasera.

\* Mgr inż. Agata Felusiak, [agata.z.felusiak@doctorate.put.poznan.pl](mailto:agata.z.felusiak@doctorate.put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0002-4927-4120> – Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, Polska

Mgr inż. Martyna Wiciak-Pikuła, [martyna.r.wiciak@doctorate.put.poznan.pl](mailto:martyna.r.wiciak@doctorate.put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0003-2648-7091> – Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, Polska

Mgr inż. Tadeusz Chwalczuk, [tadeusz.chwalczuk@put.poznan.pl](mailto:tadeusz.chwalczuk@put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0002-4009-0552> – Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, Polska

Mgr inż. Piotr Kieruj, [piotr.kieruj@put.poznan.pl](mailto:piotr.kieruj@put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0002-7110-7732> – Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, Polska

Dr hab. inż. Paweł Twardowski, [pawel.twardowski@put.poznan.pl](mailto:pawel.twardowski@put.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0002-1823-6279> – Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, Polska

W pracy [9] autorzy badali efekty wspomagania laserowego toczenia stali nierdzewnej o strukturze austenityczno-martensytycznej 15-5PH. Stwierdzili nieznaczny spadek sił skrawania oraz wzrost wartości parametrów chropowatości i wydłużenie trwałości ostrza skrawającego w porównaniu z toczeniem konwencjonalnym.

W pracy [10] omówiono wpływ laserowego wspomagania toczenia stali chromowej AISI 52100 płytkami ceramicznymi. Badacze zauważyli wyraźne zmniejszenie wartości sił skrawania oraz poprawę jakość obrabianej powierzchni.

Autorzy pracy [11] badali możliwość zastosowania technologii LAM w mikrofrezowaniu wysokoniklowej stali nierdzewnej A-286 (43HRC). Podczas badań uzyskali o ok. 30% wyższą trwałość narzędzia (w porównaniu z obróbką bez zastosowania LAM), o 10% niższe siły skrawania oraz wyższą dokładność wymiarowo-kształtową wykonywanego rowka.

## Metodyka badań

Badania przeprowadzono w Zakładzie Obróbki Skrawaniem na Politechnice Poznańskiej. Obrabiano wał o średnicy 72 mm, wykonany ze stali X2CrNiMo17-12-2, której skład według europejskiej normy PN-EN 10088 podano w tabl. I. Skrawanie zrealizowano za pomocą płytek z węgla spiekane CNMG120408-MF 1115 firmy Sandvik. Do laserowego wspomagania skrawania zastosowano laser diodowy TruDiod 3004 firmy TRUMPF. Wykonano po osiem prób obróbki konwencjonalnej oraz obróbki z jednoczesnym nagrzewaniem obrabianego materiału wiązką lasera o stałej energii równej 1,2 J/mm<sup>2</sup> i stałej średnicy wiązki równej 1,2 mm. Ze względu na stałą gęstość energii zmienna była moc lasera. Wartości parametrów skrawania podano w tabl. II. Badania wykonano na podstawie planu dwuwartościowego. Na rys. 1 przedstawiono stanowisko do toczenia ze wspomaganie laserowym i sposób zamocowania obrabianego elementu.

Każdą obrabioną powierzchnię poddano pięciu pomiarom chropowatości. Do oceny topografii powierzchni wykorzystano profilometr stacjonarny T8000. Zastosowano długość pomiarową  $l_n = 4$  mm oraz odcinek elementarny  $l_r = 0,08$  mm zgodnie z normą PN-ISO 4288:1998. Na podstawie otrzymanych profili powierzchni obliczono profile chropowatości:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_q$ ,  $R_{Sm}$ ,  $R_{dq}$ .

TABLE I. Chemical composition of X2CrNiMo17-12-2 steel according to PN-EN 10088

TABLICA I. Skład chemiczny stali X2CrNiMo17-12-2 wg PN-EN 10088

Pierwiastek	Zawartość procentowa
C	do 0,03
Si	do 1,00
Mn	do 2,00
P	do 0,045
S	do 0,015
N	do 0,11
Cr	16,50+18,50
Mo	2,00+2,50
Ni	10,00+13,00

TABLE II. Process parameters used during the experiment

TABLICA II. Parametry procesu zastosowane podczas eksperymentu

kod	$a_p$ [mm]	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm/obr]	$P$ [W]
s1	0,1	75	0,15	1800
s2	0,3	75	0,15	1800
s3	0,1	50	0,08	1200
s4	0,3	50	0,08	1200
s5	0,3	75	0,08	1800
s6	0,1	75	0,08	1800
s7	0,3	50	0,15	1200
s8	0,1	50	0,15	1200

Fig. 1. Station for laser cutting support with attached element  
Rys. 1. Stanowisko do laserowego wspomaganie skrawania wraz z zamocowanym elementem



## Wyniki badań i analiza

Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano analizy wpływu zastosowanych parametrów skrawania i gęstości energii metodą Pareto efektów dla poziomu ufności wynoszącego 0,05. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów (rys. 2).

Dla wysokościowych parametrów chropowatości ( $R_a$ ,  $R_z$ , a zwłaszcza  $R_t$ ) największy wpływ na wartość ma kombinacja głębokości skrawania oraz posuwu.

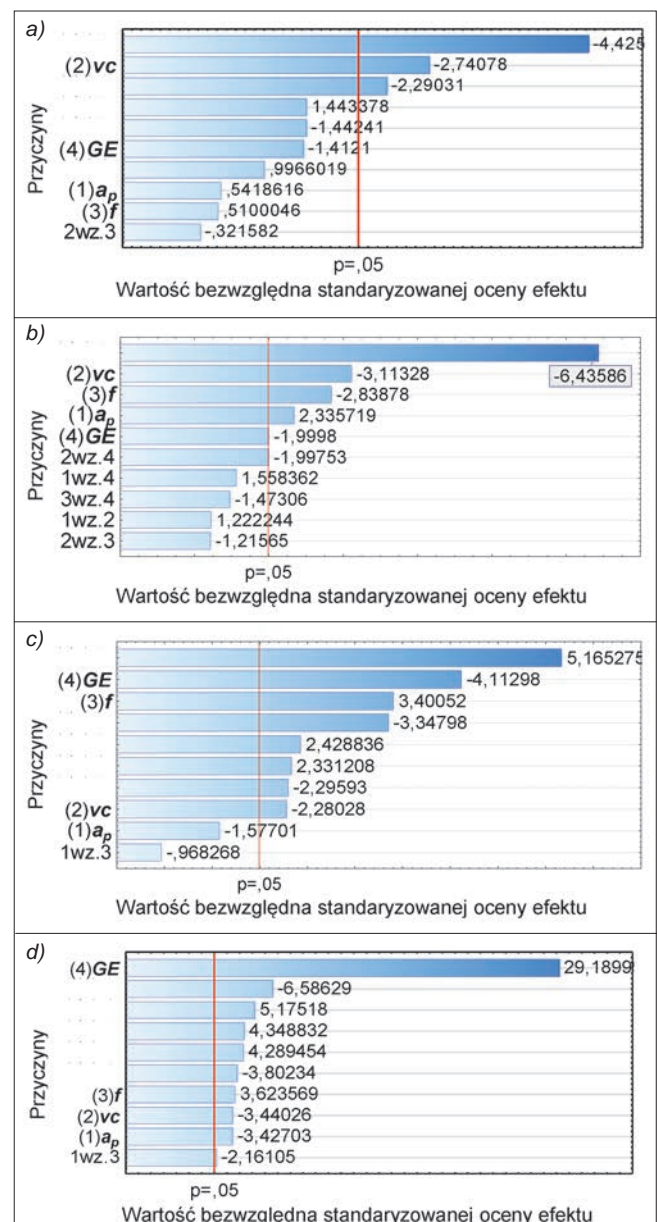


Fig. 2. Pareto effects chart for roughness parameters: a)  $R_a$ , b)  $R_t$ , c)  $R_{Sm}$ , d)  $R_{sk}$

Rys. 2. Wykres Pareto efektów dla parametrów chropowatości: a)  $R_a$ , b)  $R_t$ , c)  $R_{Sm}$ , d)  $R_{sk}$

W przypadku parametru  $Rt$  zastosowanie wspomaganie laserowego wpływa nań w niewielkim stopniu i jest na granicy istotności (rys. 2b). Inaczej przedstawia się istotność wpływu nastaw na parametr chropowatości  $RSm$  (rys. 2c). Tu najistotniejsze są kombinacje głębokości skrawania ze wspomaganie laserowym. W przypadku parametrów asymetrii i amplitudy ( $Rsk$ ,  $Rku$ ) najważniejszym czynnikiem wpływającym na ich wartości jest to, czy zastosowano wspomaganie laserowe skrawania, czy nie, przy czym wszystkie nastawy i ich kombinacje mają istotny wpływ na te parametry chropowatości.

Na wykresach (rys. 3) porównano średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni (uśrednione z pięciu pomiarów), obrabianej z zastosowaniem wspomaganie laserowego skrawania i bez tego wspomaganie.

Dla parametrów wysokościowych chropowatości wartości średnie przedstawiają się jak na rys. 3a.

Przy najkorzystniejszym doborze nastaw ( $s_2$ ) i zastosowaniu wspomaganie laserowego uzyskano znaczące zmniejszenie wartości:  $Ra$  – o ok. 53%,  $Rz$  – o ok. 38%,  $Rt$  – o ok. 50%.

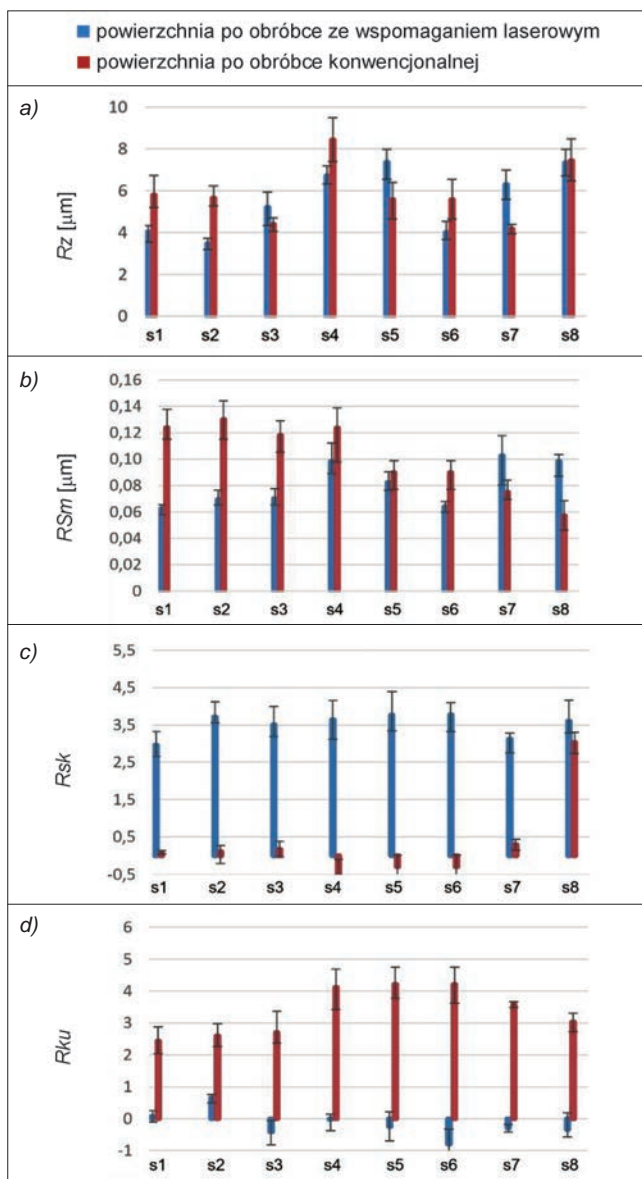


Fig. 3. Comparison of average values of  $Rz$  (a),  $RSm$  (b),  $Rsk$  (c) and  $Rku$  (d) parameters for surfaces after treatment with laser assistance and without laser assistance

Rys. 3. Porównanie wartości średnich parametrów  $Rz$  (a),  $RSm$  (b),  $Rsk$  (c) i  $Rku$  (d) dla powierzchni po obróbce ze wspomaganie laserowym i bez wspomaganie laserowego

Bardzo niekorzystne wyniki otrzymano przy większej głębokości skrawania ( $s_5$  oraz  $s_7$ ). W serii siódmej doszło do wzrostu parametru:  $Ra$  – o ok. 78%,  $Rt$  – o ok. 54%,  $Rz$  – o ok. 51%. Może to mieć związek z większym uplastycznieniem materiału obrabianego. Prędkość skrawania była niższa, więc materiał był usuwany wolniej niż w przypadku  $s_2$ , przez co oddziaływanie ciepła na powierzchnię trwało dłużej i doszło do intensywniejszego zmiękczenia materiału obrabianego.

W przypadku toczenia bez wspomaganie średni odstęp między wzniesieniami profilu chropowatości  $RSm$  jest zbliżony do wartości posuwu. Ze względu na zastosowanie LAM w trakcie skrawania występuje plastyczne płynięcie materiału obrabianego, przez co wartości są różne od posuwu na obrót.

Jak już zauważono, zastosowanie LAM silnie wpływa na amplitudę oraz skośność profilu chropowatości (rys. 3c i 3d). W przypadku zastosowania LAM rozkład wartości  $Rsk$  jest wyraźnie przesunięty w prawo w porównaniu z obróbką konwencjonalną, charakteryzująca się bardziej scentralizowanym rozkładem, a kurtoza  $Rku$  jest zdecydowanie bardziej zbliżona do zera.

Laserowe wspomaganie nie ma tak istotnego wpływu na średnie kwadratowe pochylenie profilu  $Rdq$ . W większości prób różnice są niewielkie (jedynie w przypadkach  $s_5$  i  $s_7$  występuje większe uplastycznienie materiału i można zauważyć wyraźniejszy wzrost wartości  $Rdq$ ).

## Podsumowanie

Biorąc pod uwagę chropowatość powierzchni, najkorzystniejsze w przypadku obróbki stali nierdzewnej X2CrNiMo17-12-2 okazało się zastosowanie laserowego wspomaganie toczenia i parametrów skrawania:  $a_p = 0,3$  mm,  $v_c = 75$  m/min oraz  $f = 0,15$  mm/obr.

Ze względu na ryzyko zbyt dużego uplastycznienia materiału niekorzystne jest jego dłuższe nagrzewanie, a więc stosowanie niskich prędkości skrawania lub posuwu.

Technologia LAM pozwala na poprawę jakości wykonanej powierzchni dzięki zredukowaniu wartości parametrów chropowatości nawet o połowę.

## LITERATURA

- [1] Bleicher F., Finkeldei D., Siller A. "Machining of difficult-to-cut materials". *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 27, 1 (2016): 473–479.
- [2] Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): 587–593.
- [3] Przystacki D., Chwalczuk T., Wojciechowski S. "The study on minimum uncut chip thickness and cutting forces during laser-assisted turning of WC/NiCr clad layers". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 91 (2017): 3887–3898.
- [4] Wojciechowski S., Przystacki D., Chwalczuk T. "The evaluation of surface integrity during machining of Inconel 718 with various laser assistance strategies". *MATEC Web of Conferences*. 136, (2017): 01006-1–01006-5.
- [5] Felusiak A., Chwalczuk T., Wiciak M. "Surface roughness characterization of Inconel 718 after laser assisted turning". *MATEC Web of Conferences*. 237 (2018): 01004-1–01004-6.
- [6] Rahman Rashid R.A., Sun S., Wang G., Dargusch M.S. "An investigation of cutting forces and cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 63 (2012): 58–69.
- [7] Birmingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. "A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel". *Wear*. 328–329 (2015): 518–530.
- [8] Przystacki D., Bartkowska A., Kukliński M., Kieruj P. "The effects of laser surface modification on microstructure of 1.4550 stainless steel". *MATEC Web of Conferences*. 237 (2018): 02009-1–02009-5.
- [9] Palanisamy D., Senthil P. "Machinability study of laser surface treated 15-5 PH stainless steel". *Materials and Manufacturing Processes*. 31, 13 (2016): 1755–1762.
- [10] Raghavan S., Melkote S., Hashimoto F. "Laser tempering based turning process for efficient machining of hardened AISI 52100 steel". *Journal of Manufacturing Processes*. 15, 3 (2013): 318–328.
- [11] Bucciarelli A., Kuila P.D., Melkote S.N., Fortunato A. "Micro-machinability of A-286 steel with and without Laser Assist". *Procedia CIRP*. 46 (2016): 432–435.