

Effect of cutting parameters on geometrical surface structure of SLM manufactured CoCr alloy after face turning

Wpływ parametrów skrawania przy toczeniu czołowym na strukturę geometryczną powierzchni stopu CoCr otrzymanego metodą SLM

MARTA B. KRAWCZYK
MARCIN A. KRÓLIKOWSKI
KRZYSZTOF FILIPOWICZ
DANIEL GROCHAŁA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.114>

Research on effect of machining parameters on geometrical surface structure of SLM manufactured CoCr alloy shafts after face turning is presented in the paper. Machining parameters were selected in order to obtain continuous variation of cutting speed at fixed feed ratio for given cutting depth. In consequent steps feed ratio was changed at fixed, unchanged cutting depth. As a criteria of optimal machining parameters, selected surface geometry parameters were measured. Experimental research was carried out by turning with typical tool and commercial cutting inserts

KEYWORDS: geometrical surface structure, chrome-cobalt alloy, SLM, face turning

Przedstawiono badania wpływu parametrów technologicznych skrawania na strukturę geometryczną powierzchni po toczeniu czołowym wałów ze stopu kobaltowo-chromowego (CoCr), wytwarzanych metodą przyrostową – selektywnym stapianiem wiązką lasera (SLM). Parametry toczenia dobrano tak, aby uzyskać ciągłą zmienność prędkości skrawania przy stałym posuwie dla ustalonej grubości warstwy skrawanej. Na kolejnych etapach zmieniano posuw, ale pozostawiono stałą grubość warstwy skrawanej. Wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni posłużyły za kryteria do ustalenia optymalnych warunków skrawania dla wykonanych stopów. W badaniach stosowano handlowe płytki skrawające z powłoką PVD (Ti, Al)N₂.

SŁOWA KLUCZOWE: SGP, stop kobaltowo-chromowy, SLM, toczenie czołowe

Wprowadzenie

Obróbka przyrostowa z metali – tak mocno akcentowana w charakterystyce czwartej rewolucji przemysłowej – wymusza adaptację klasycznych technologii, aby uzyskać produkty o konkurencyjnej jakości [2]. Tak też się dzieje z elementami wytwarzanymi przyrostowo ze stopów trudno skrawalnych, do których można zaliczyć stopy chromu z kobaltem, stosowane przeważnie w medycynie [1, 3, 4]. Ze względu na wysoką odporność na zużycie ścierne z materiałów kobaltowo-chromowych wytwarza się przede wszystkim całkowite implanty kolanowe i biodrowe [5, 6]. Stopy kobaltowo-chromowe są odporne na korozję, pełzanie i mają silną tendencję do umacniania odkształceniowego, co wraz ze słabą przewodnością cieplną,

wysoką wytrzymałością i twardością skutkuje ich słabą skrawalnością [5, 7–9]. Obróbka CoCr jest powszechnie kojarzona z krótką żywotnością narzędzia i niską jakością powierzchni, a zatem – niską produktywnością i wysokimi kosztami wytwarzania [5–7].

Współcześnie oczekuje się coraz wyższej dokładności wymiarów i kształtu produkowanych części, dlatego w inżynierii mechanicznej elementy wytwarzane przyrostowo z metali prawie zawsze muszą przejść obróbkę wykończeniową. Może to być obróbka ubytkowa, a zwłaszcza skrawaniem, realizowana na wydajnych centrach obróbkowych. Jednak przy niewielkich tolerancjach (V–VI klasa IT) należy uwzględnić dodatkowo stan powierzchni. Wymiary gabarytowe części mogą się znacząco zmienić po uwzględnieniu chropowatości i specyficznych właściwości skrawanych stopu CoCr (w postaci spiekanej lub odlewanej). Poznanie tych specyficznych właściwości oraz opracowanie optymalnych parametrów technologicznych obróbki w celu spełnienia kryteriów jakości powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej było tematem przeprowadzonych badań.

Badania doświadczalne

Próbki do badań wykonano ze stopu kobaltowo-chromowego (ASTM F75) z wykorzystaniem techniki wytwarzania przyrostowego, jaką jest selektywne stapianie wiązką lasera (*selective laser melting* – SLM). Proces prowadzono na urządzeniu REALIZER II 250 (MTT-Group), wyposażonym w laser Nd:YAG o mocy 100 W. Wytworzono wiele próbek o średnicy $\varnothing 15$ mm i wysokości 30 mm. Parametry procesu SLM zestawiono w tabl. I.

Próbki walcowe poddano procesowi toczenia czołowego na obrabiarce AFM TAE 35. Stosowano płytki CNMG 1204 08-SMR 1105 firmy Sandvik z powłoką PVD (Ti, Al)N₂,

TABLE I. SLM process parameters
TABLICA I. Parametry procesu SLM

| | |
|--|-------|
| Moc lasera P [W] | 100 |
| Prędkość skanowania V [mm/s] | 600 |
| Odległość pomiędzy ścieżkami lasera h [mm] | 0,12 |
| Grubość warstwy d [mm] | 0,03 |
| Objętościowa gęstość energii ϵ [J/mm ³] | 99,21 |

* Dr inż. Marta B. Krawczyk, marta.krawczyk@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-8854-5758> – Katedra Technologii Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska
Dr inż. Marcin A. Królikowski, marcin.krolikowski@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3668-8463> – Katedra Technologii Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska
Dr inż. Krzysztof Filipowicz, krzysztof.filipowicz@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4839-2202> – Katedra Technologii Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska
Dr inż. Daniel Grochała, daniel.grochala@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2553-7739> – Katedra Technologii Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska

przeznaczone do materiałów trudnoobrabialnych. Obróbkę prowadzono przy stałych parametrach: prędkości skrawania $V_c = 60$ m/min; prędkości obrotowej $n = 1250$ min⁻¹ i głębokości skrawania $a_p = 0,5$ mm, natomiast dla prędkości posuwu f_n przyjęto kolejno wartości: 0,1 (P1); 0,15 (P2); 0,20 (P3); 0,25 (P4); 0,40 mm/obr (P5). Jako P0 oznaczono próbkę wyjściową po procesie SLM. Do każdego zabiegu zakładano nową płytkę.

Badania struktury geometrycznej powierzchni próbek

Dla powierzchni próbek po procesie toczenia wyznaczono wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni (SGP) na maszynie AltSurf A520, wyposażonej w chromatyczny sensor konfokalny CL2 o zakresie pracy do 400 μ m i rozdzielczości w optycznej osi przyrzędu 8 nm. Pomiar wykonano na polach o wymiarach 2,0 \times 5,0 mm wzdłuż promienia badanych walców. Rozdzielczość skanowania ustalono na: wzdłuż osi X – 0,47 μ m, wzdłuż osi Y – 1,97 μ m; dało to prawie 110 mln punktów odwzorowania dla każdej powierzchni.

Cyfrową obróbkę zebranej chmury punktów oraz wyznaczenie wartości stereometrycznych parametrów SGP [10] przeprowadzono w oprogramowaniu AltMap PREMIUM 6.2. Dla każdego skanu powierzchni poziomowano zebraną chmurę punktów (płaszczyzną średnią, aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów). Ze względu na dużą chropowatość próbki po procesie SLM w trakcie skanowania powierzchni pojawiły się błędnie zebrane punkty (podwójne odbicia w „soczewkach”, czy załamania na krawędziach). Aby je usunąć, przyjęto wartości progowe zebranego sygnału na poziomie 0,05÷99,95% (usuwane punkty ustawiono jako wartości niemierzone). Na koniec wyznaczono wartości parametrów opisujących wysokość powierzchni: S_a i S_q , parametrów krzywej nośności materiału: S_k , S_{pk} , S_{vk} oraz parametrów charakteryzujących profil chropowatości: R_a i R_z [11]. Wyniki zaprezentowano na rys. 1–6. W tabl. II zestawiono parametry SGP uzyskane dla próbki wyjściowej (P0).

TABLE II. Summary of selected SGS parameters obtained for CoCr sample after SLM proces

TABLICA II. Zestawienie wybranych parametrów SGP otrzymanych dla próbki CoCr po procesie SLM

| Parametr | S_a [μ m] | S_q [μ m] | S_k [μ m] | S_{pk} [μ m] | S_{vk} [μ m] | |
|----------|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------|
| P0 | 33,0 | 46,2 | 68,2 | 19,4 | 109 | |
| Parametr | Sr_1 [%] | Sr_2 [%] | V_m [mm^3/mm^2] | V_v [mm^3/mm^2] | R_a [μ m] | R_z [μ m] |
| P0 | 5,39 | 82,2 | 0,00123 | 0,0444 | 28,0 | 181 |

Na podstawie analizy wyników zaprezentowanych na rys. 1 można zauważyć, że wraz ze wzrostem parametrów obróbki (prędkości posuwu) rosną parametry S_a oraz S_q . Przy czym największy jest wzrost tych parametrów dla próbki o najwyższej prędkości posuwu. Jednak w porównaniu z powierzchnią wyjściową uzyskane rezultaty są nawet 46-krotnie niższe.

Na rys. 2 przedstawiono wartości krzywej nośności materiału S_k , S_{pk} oraz S_{vk} . Zauważalne jest utrzymanie tendencji wzrostowej parametrów SGP wraz ze wzrostem prędkości posuwu. Biorąc pod uwagę wartości parametru S_{vk} – który odpowiada za zatrzymanie oleju, smarów i brudu na powierzchni – dla P5 jest on prawie 8,5-krotnie wyższy niż dla P1 i ponad 10-krotnie niższy w porównaniu z P0.

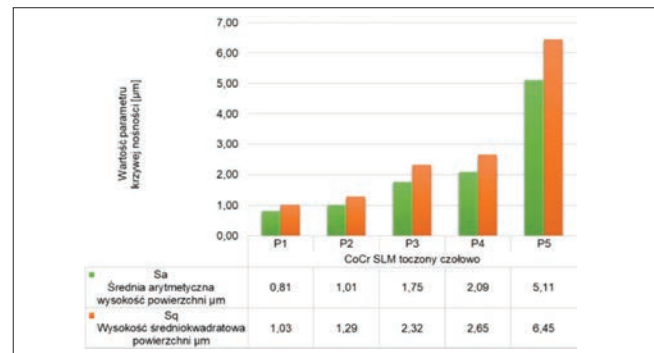


Fig. 1. Values of altitude parameters SGS (S_a and S_q) obtained after face turning of CoCr materials produced by the SLM method
Rys. 1. Wartości wysokościowych parametrów SGP (S_a oraz S_q) po toczeniu czółowym materiałów CoCr wytwarzanych metodą SLM

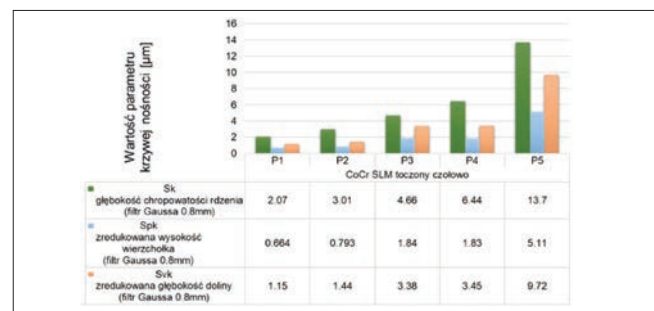


Fig. 2. SGS values of S_k , S_{pk} and S_{vk} load capacity curve (core width, peak height and depth of surface valleys) after face turning for CoCr materials manufactured in the SLM process

Rys. 2. Wartości parametrów SGP krzywej nośności materiału S_k , S_{pk} oraz S_{vk} (szerokości rdzenia, wysokość pików oraz głębokość dolin powierzchni) po toczeniu czółowym dla materiałów CoCr wytwarzanych w procesie SLM

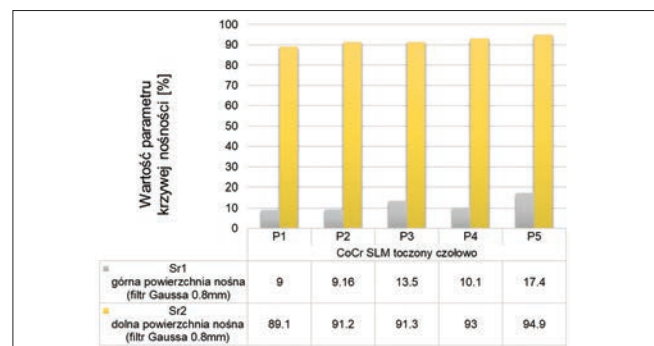


Fig. 3. Values of SGS technological parameters after face turning of CoCr materials produced in the SLM process

Rys. 3. Wartości parametrów technologicznych SGP po toczeniu czółowym materiałów CoCr wytwarzanych w procesie SLM

Na rys. 3 zaprezentowano wartości parametrów technologicznych: Sr_1 (obszarów wzniesień wypełnionych materiałem) oraz Sr_2 (obszarów wgłębień wolnych od materiału), zaliczanych do przestrzennych parametrów chropowatości. W analizowanych przypadkach wartości Sr_2 nie zmieniają się znacznie wraz ze zmianą f_n i są wyższe niż uzyskane dla P0 (maksymalna różnica wynosi 13%). Inaczej wygląda sytuacja z parametrem Sr_1 – jego wartość rośnie ze wzrostem f_n . We wszystkich przypadkach uzyskano wartości wyższe niż wyjściowe (P0), co jest związane ze zmniejszeniem chropowatości powierzchni.

Funkcjonalną analizę powierzchni oparto na dwóch parametrach objętościowych: V_m (objętości materiału powierzchni) oraz V_v (objętości pustej przestrzeni powierzchni), których wartości przedstawiono na rys. 4. Również w tym przypadku analizowane parametry rosną wraz ze wzrostem prędkości posuwu, przy czym w porównaniu z P0 otrzymane wartości są niższe.

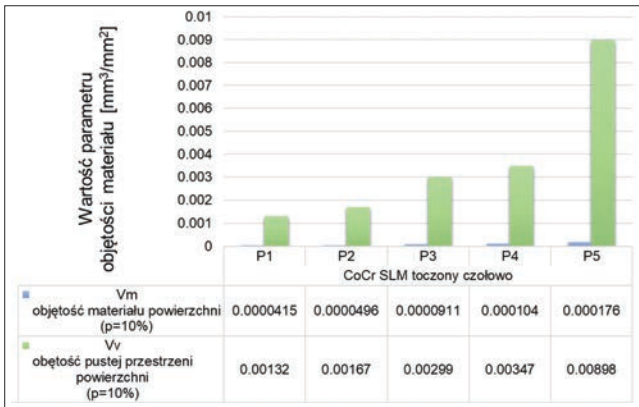


Fig. 4. Values of the material volume parameters after face turning for CoCr materials produced in the SLM process

Rys. 4. Wartości parametrów objętości materiału po toczeniu czołowym dla materiałów CoCr wytwarzanych w procesie SLM

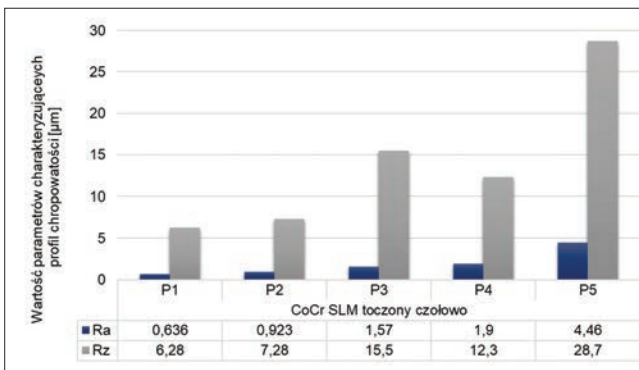


Fig. 5. Characteristic values of the roughness profile (R_a and R_z) after face turning of CoCr materials manufactured in the SLM process

Rys. 5. Wartości charakteryzujące profil chropowatości (R_a i R_z) po toczeniu czołowym materiałów CoCr wytwarzanych w procesie SLM

Na rys. 1–5 można dostrzec korelację pomiędzy wzrostem parametrów SGP i wzrostem f_n . Dane literaturowe wskazują, że to właśnie prędkość posuwu ma największy wpływ na jakość powierzchni w przypadku obróbki skrawaniem stopów CoCr [9, 12]. Najmniej korzystne wyniki uzyskano przy najwyższej wartości f_n , która była również maksymalną zalecaną przez producenta dla wybranego narzędzia.

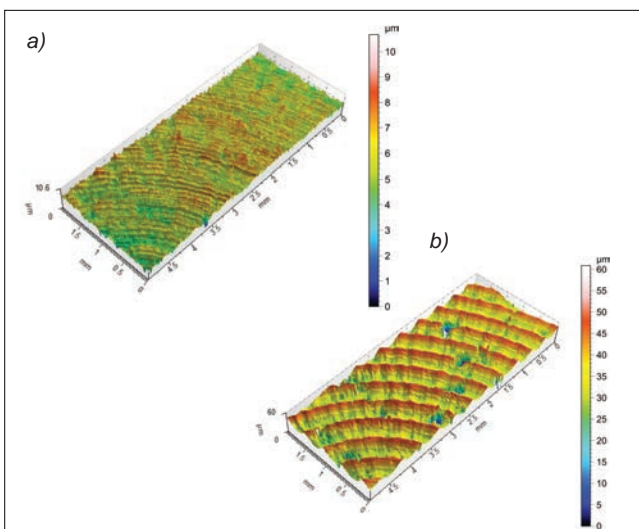


Fig. 6. Surface profiles obtained for selected samples in the sample axis depending on the feed rate f_n : a) sample P1: $f_n = 0.10$ mm/rev

Rys. 6. Profile powierzchni uzyskane dla wybranych próbek w osi próbki w zależności od posuwu f_n : a) próbka P1: $f_n = 0,10$ mm/obr; b) P5: $f_n = 0,40$ mm/obr

Na podstawie analizy profili można zauważyć, że przy maksymalnej badanej prędkości posuwu ($f_n = 0,4$ mm/obr) na próbce widoczne są wgłębienia, które mogą stanowić odpryski spowodowane zbyt dużą wartością f_n . To samo zaobserwowali inni badacze [12, 13]. Według nich zużycie adhezyjne i odpryskiwanie były dominującym zużyciem działającym na narzędzie i powierzchnie czołowe przy wysokiej prędkości posuwu.

Podsumowanie

Przedstawiono badania SGP po toczeniu czołowym sześciu próbek wytworzonych metodą SLM ze stopu CoCr. Rozpatrywano wielkości charakteryzujące parametry wysokości, objętości, funkcyjne oraz profile chropowatości. Analiza ukazała korelację pomiędzy wzrostem posuwu a uzyskanymi wartościami poszczególnych parametrów SGP. Badania te potwierdziły, że wzrost prędkości posuwu wpływa negatywnie na jakość powierzchni również w przypadku materiałów otrzymywanych w procesie SLM. Jednak z praktycznego punktu widzenia, w zależności od obszaru zastosowania, możliwe jest uzyskanie powierzchni o korzystnym stosunku głębokich rys i niewielkich wierzchołków nierówności, gwarantującej wysoką biogodność, np. z tkankami kostnymi.

LITERATURA

- [1] Karpuschewski B., Pieper H.J., Krause M., Döring J. "CoCr Is Not the Same: CoCr-blanks for dental machining". *Future Trends in Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg (2013): 261–274, https://doi.org/10.1007/978-3-642-24491-9_26.
- [2] Królikowski M., Krawczyk M. „Obróbka skrawaniem oraz techniki przyrostowe jako integralne etapy procesu wytwarzania hybrydowego z metali w Przemysle 4.0”. *Mechanik*. 8–9 (2018): 769–771, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.129>.
- [3] Ahearne E., Baron S. "Fundamental mechanisms in orthogonal cutting of medical grade cobalt chromium alloy (ASTM F75)". *CIRP – Journal of Manufacturing Science and Technology*. 19 (2017): 1–6, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.02.001>.
- [4] Pasang T., Lees S., Takahashi M., Fujita T., Conor P., Tanaka K., Kamiya O. "Machining of dental Alloys: Evaluating the surface finish of laterally milled Co-Cr-Mo Alloy". *Procedia Manufacturing*. 13 (2017): 5–12, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.002>.
- [5] Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. "Cryogenic high speed machining of cobalt chromium alloy". *Procedia CIRP*. 46 (2016): 404–407, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.045>.
- [6] Axinte D., Guo Y., Liao Z., Shih A. J., M'Saoubi R., Sugita N. "Machining of biocompatible materials – Recent advances". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Available online: 6 June 2019. In press: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.003>.
- [7] Aykut Ş., Bağcı E., Kentli A., Yazıcıoğlu O. "Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool". *Materials & Design*. 28, 6 (2007): 1880–1888, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.014>.
- [8] Zeng S., Blunt L. "Experimental investigation and analytical modelling of the effects of process parameters on material removal rate for bonnet polishing of cobalt chrome alloy". *Precision Engineering*. 38, 2 (2014): 348–355, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.005>.
- [9] Zaman H.A., Sharif S., Kim D-W., Idris M.H., Suhaimi M.A., Tumurkhuyag Z. "Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review". *Procedia Manufacturing*. 11 (2017): 563–570, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150>.
- [10] PN-EN ISO 25178-2:2012. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [11] PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010 Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [12] Bruschi S., Ghiotti A., Bordin A. "Effect of the process parameters on the machinability characteristics of a CoCrMo Alloy". *Key Eng. Mater.* 554–557 (2013): 1976–1983, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1976>.
- [13] Shao H., Li L., Liu L.J., Zhang S.Z. "Study on machinability of a stellite alloy with uncoated and coated carbide tools in turning". *J. Manuf. Process.* 15, 4 (2013): 673–681, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.10.001>.