

The effect of cutting speed on the functional properties of Inconel 625 surface after grinding

Wpływ prędkości skrawania na cechy funkcjonalne powierzchni Inconelu 625 po obróbce szlifowaniem



Inconel 625 samples were subjected to the grinding process at 3 levels of cutting speed (13, 23 and 33 m/s). Anal. of topographic features of the machined surfaces and their morphol. was carried out using a scanning profilometer and SEM. The evaluation of the functional properties of the machined surfaces was carried out by analyzing the parameters of the Abbott-Firestone surface curve. The morphol. of the machined surface and its functional properties changed with the change of cutting speed. The increase in cutting speed was accompanied by an improvement in the functional properties of the surface with a local optimum, for which a further increase in cutting speed did not lead to a significant change in the values of the tested parameters.

Keywords: grinding, Inconel 625, roughness, surface morphology

Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych opisujących wpływ prędkości skrawania w procesie szlifowania Inconelu 625 na właściwości funkcjonalne obrabianych powierzchni i ich morfologię. Stwierdzono, że morfologia obrabianej powierzchni i jej cechy funkcjonalne zmieniały się wraz ze zmianą prędkości skrawania. Wzrost prędkości skrawania prowadził do poprawy właściwości funkcjonalnych powierzchni opisanych parametrami krzywej Abbotta i Firestone'a oraz chropowatości. Zaobserwowano lokalne optimum, dla którego dalsze zwiększenie prędkości skrawania nie prowadziło do istotnej zmiany wartości badanych parametrów.

Słowa kluczowe: szlifowanie, Inconel 625, chropowatość, morfologia powierzchni

Rozwój technologii chemicznych i procesowych w dużej mierze zależy od wprowadzania innowacyjnych rozwiązań w zakresie konstrukcji urządzeń technologicznych, które muszą być dostosowane do trudnych warunków pracy. W reaktorach chemicznych i elementach instalacji przetwarzania chemicznego, gdzie mogą występować zmienne naprężenia, wysokie temperatury i korozyjne środowiska, rośnie znaczenie stosowania superstopów na bazie niklu, takich jak Inconel 625¹⁾. Właściwości stopu, takie jak wysoka twardość na gorąco, odporność na korozję i utlenianie, wytrzymałość i właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach powodują, że Inconel 625 znajduje szerokie zastosowanie w konstrukcjach urządzeń technologicznych,

które muszą sprostać wymagającym warunkom pracy w przemyśle chemicznym²⁾. Dalszy postęp w tej dziedzinie związany jest z opracowaniem efektywnych metod kształtowania materiałów trudnoobrabialnych, takich jak Inconel^{3, 4)}. Wysoka wytrzymałość, twardość, ciągliwość oraz podatność na utwardzanie superstopów niklu powoduje znaczne trudności w ich obróbce^{5, 6)}. Spośród różnego typu technologii, takich jak skrawanie, obróbki erozyjne i elektrochemiczne, szlifowanie umożliwia precyzyjne kształtowanie złożonych geometrycznie części z materiałów trudno obrabialnych^{7, 8)}. Ze względu na złożoność oddziaływania zjawisk kontaktowych ziaren ściernych z powierzchnią przedmiotu obrabianego kluczowe jest wyznaczenie wpływu głównych technologicznych parametrów procesu szlifowania na jego skutki jakościowe^{9, 10)}. Dotychczasowe badania procesu szlifowania Inconelu wskazują, że prędkość skrawania ma dominujący wpływ na uzyskiwaną chropowatość obrabianych powierzchni¹¹⁾. Niemniej jednak w większości publikacji autorzy koncentrują swoją uwagę na analizie parametrów R_a lub S_a , które nie dostarczają wystarczających informacji dotyczących cech funkcjonalnych uzyskanych powierzchni¹²⁾.

W pracy skoncentrowano uwagę na wyznaczeniu wpływu prędkości skrawania na ocenę morfologii badanej powierzchni i jej cechy funkcjonalne, które wyznaczono na podstawie analizy krzywej Abbotta i Firestone'a.



Mgr inż. Adrian KOPYTOWSKI (ORCID: 0000-0001-5185-3706) w roku 2018 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Warszawskiej. Jest zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Instytutu Technik Wytwarzania tej samej uczelni, gdzie zajmuje się modelowaniem i optymalizacją technologii obróbek ściernych i erozyjnych. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Technik Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: adrian.kopytowski@pw.edu.pl

Część doświadczalna

Surowce

Obróbce szlifowaniem poddano próbki o wymiarach 20×20×50 mm wykonane z Inconelu 625. Proces szlifowania próbek prowadzono ściernicą firmy Norton Saint-Gobain 01_250×32×76_IPA_100_HA_26VTX2 z ziarnami ściernymi z zielonego węgla krzemu. Zastosowana ściernica przeznaczona jest do obróbki materiałów trudno skrawalnych.

Metodyka badań

Próby procesu szlifowania przeprowadzono na stanowisku badawczym składającym się ze szlifierki do płaszczyzn Jotes SPC-20b, wyposażonej w płynną regulację prędkości obrotowej wrzeciona oraz system pomiarowo-kontrolny sterowania posuwem poprzecznym i wzdłużnym stołu obrabiarki.

Badania jakości obrobionych powierzchni przeprowadzono, analizując cechy topografii obrabianych powierzchni i ich morfologię. Pomiary topografii wykonano w profilometrze skanującym Taylor Hobson Talysurf Series 2. Analizę morfologii powierzchni przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Jeol JCM-7000 Neoscope.

Głównym celem badań procesu szlifowania Inconelu 625 było wyznaczenie wpływu prędkości skrawania na cechy funkcjonalne obrabianych powierzchni i ich morfologię. Badania doświadczalne procesu szlifowania Inconelu 625 prowadzono dla przyjętych trzech poziomów prędkości skrawania, czyli 13, 23 i 33 m/s. Próbki mocowano w imadle precyzyjnym, które znajdowało się na stole szlifierki. Wywarzoną i naostrzoną ściernicą wykonano trzy przejścia szlifujące, każdorazowo zagłębiając się w materiał o 0,03 mm z parametrami wejściowymi wynikającymi z przyjętej próby.

Wyniki badań

W pierwszym etapie badań procesu szlifowania Inconelu 625 przeprowadzono ocenę wpływu prędkości skrawania na morfologię obrobionych powierzchni. Analiza uzyskanych zdjęć SEM (rys. 1) wskazuje na odmienny przebieg procesu mikroskrawania i pracy zespolonych w ściernicy ziaren ściernych dla badanych poziomów prędkości skrawania. Uzyskane obrazy powierzchni obrobionej z najniższą prędkością skrawania (13 m/s) uwidoczniły liczne defekty (rys. 1a). Mała prędkość skrawania prowadziła do wzrostu zużycia ściernicy oraz silnego obciążenia ziaren ściernych. W efekcie ujawniły się inicjacje rys w postaci wgłębienia wierzchołków ścierniwa, które następnie prowadziły do plastycznego płynięcia materiału. Ślady te uformowały się w wyniku zmiennej wysokości umieszczenia ziaren w czynnej powierzchni ściernicy (CPS). W wyniku tego dodatkowo możliwe było zaobserwowanie stosunkowo głębokich rys. Zauważyć można występujące obok siebie głębokie ślady, które wypiętrzają strukturę materiału obrabianego

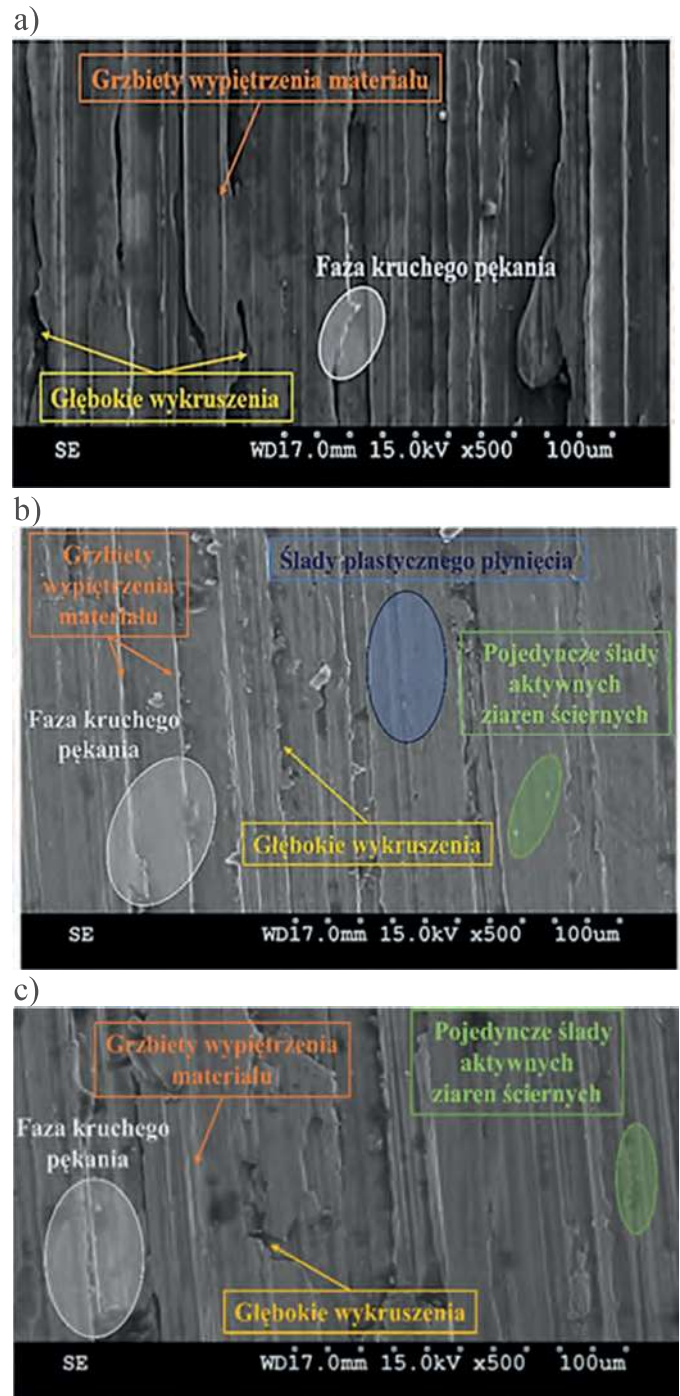


Fig. 1. Inconel 625 surface morphology after grinding process with cutting speed: a) $V_c = 33$ m/s, b) $V_c = 23$ m/s, c) $V_c = 13$ m/s (500× magnification)

Rys. 1. Morfologia powierzchni Inconelu 625 po procesie szlifowania: a) $V_c = 33$ m/s, b) $V_c = 23$ m/s, c) $V_c = 13$ m/s (powiększenie 500×)

do postaci wąskiego grzbietu. Jego charakter można opisać jako postrzępiony, szczególnie u wierzchołków. Można przyjąć, że dochodziło do formowania się nieodciętego wióra. Działo się tak wskutek braku zdolności sąsiadujących ze sobą ziaren do odcięcia wióra. Obserwacja próbek dowodzi występowania fazy kruchego pęknięcia. Obszary te są nieregularne o znacznej powierzchni w porównaniu z pozostałymi analizowanymi sytuacjami.

W przypadku zwiększonej prędkości skrawania (23 m/s) ujawniły się obszary, które można przypisać do *quasi*-kruchego pęknięcia (rys. 1b). W związku ze zmianą parametrów wydłu-

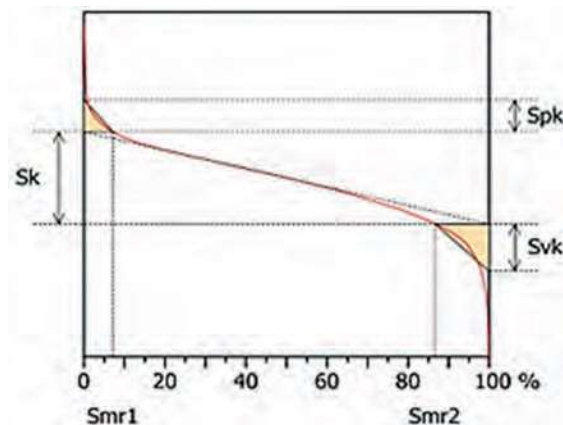
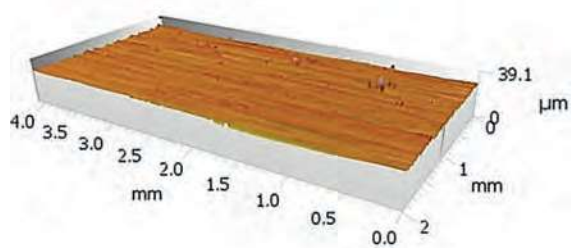


Fig. 2. Surface texture and Abbott-Firestone curve after grinding of Inconel 625 at a cutting speed of 33 m/s

Rys. 2. Struktura geometryczna powierzchni i krzywa Abbotta i Firestone'a po obróbce szlifowaniem Inconelu 625 z prędkością skrawania 33 m/s

żył się czas pojedynczego kontaktu ziarna z obrabianą powierzchnią. Powstałe defekty miały szerszy rozkład na powierzchni, co wynikało z budowy tarczy oraz zastosowanej prędkości posuwu poprzecznego. Obserwowano również na powierzchni pola uplastycznione, powstające w wyniku lokalnego oddziaływania temperatury spowodowanego tarcieniem. Miejsca te miały charakter wzdłużny, odpowiadający kierunkowi przemieszczania się tarczy.

Obserwacja morfologii powierzchni uzyskanej dla największej prędkości skrawania (33 m/s) wskazuje, że odkształcenie materiału wynikało głównie z pracy wierzchołków ziaren ściernych, wskutek czego dochodziło do wypiętrzania grzbietów (rys. 1c). Miejscowo zaobserwować można odkształcenia krawędzi bocznych oraz ich propagację w obszary z lokalnymi głębokimi wykruszeniami powierzchni. Obserwacja części rysunku umożliwia zauważenie odkształceń, które powstały w wyniku kontaktu wierzchołków ziaren ściernych odwzorowujących ich kształt geometryczny.

W kolejnym etapie badań przeprowadzono ocenę właściwości funkcjonalnych obrobionych w procesie szlifowania powierzchni poprzez analizę parametrów powierzchniowej

krzywej Abbotta i Firestone'a. Przyjęte do oceny parametry pozwalają na ocenę właściwości trybologicznych powierzchni: (i) S_{vk} – zredukowana wysokość wgłębień, umożliwiająca ocenę zdolności utrzymywania płynu przez powierzchnie ślizgowe; (ii) S_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień, umożliwiająca ocenę odporności powierzchni na ścieranie i (iii) S_k – wysokość chropowatości rdzenia, określająca głębokość chropowatości po wstępnym docieraniu.

Przykładowy obraz stereometryczny powierzchni wraz z krzywą udziału nośnego dla największej prędkości skrawania przedstawiono na rys. 2.

Zredukowana wysokość wzniesień S_{pk} (rys. 3) dla próbki obrobionej przy najmniejszej prędkości skrawania wynosiła 2,18 μm , a wysokość chropowatości rdzenia $S_k = 6,25 \mu\text{m}$. W zależności od zastosowanej prędkości skrawania następowały zmiany wartości poszczególnych parametrów opisujących krzywą Abbotta i Firestone'a oraz wysokości chropowatości S_a (rys. 3)^[3].

Wraz ze wzrostem prędkości szlifowania wybrane parametry chropowatości 3D (S_a , S_k , S_{pk} , S_{vk}) malały. Zaobserwowano znaczący spadek wartości parametrów S_k i S_{vk} . Zmniejszenie wysokości chropowatości rdzenia i zredukowanych wierzchołków wzniesień o ok. 7 μm w istotny sposób wpływało na wzrost odporności powierzchni na ścieranie. Po osiągnięciu wartości $V_c = 23 \text{ m/s}$ następowało widoczne spowolnienie trendu spadku wysokości chropowatości. Średnia arytmetyczna wysokości chropowatości S_a , zredukowana wysokość wierzchołków S_{pk} oraz zredukowana wysokość doliny S_{vk} dla najwyższej badanej wartości prędkości skrawania $V_c = 33 \text{ m/s}$ wynosiły ok. 2 μm . Uzyskane wyniki wskazują na równomierny rozkład wysokości wierzchołków i wgłębień. Powierzchnia charakteryzowała się zdolnością do utrzymywania płynu przez powierzchnie ślizgowe i znaczną odpornością na ścieranie.

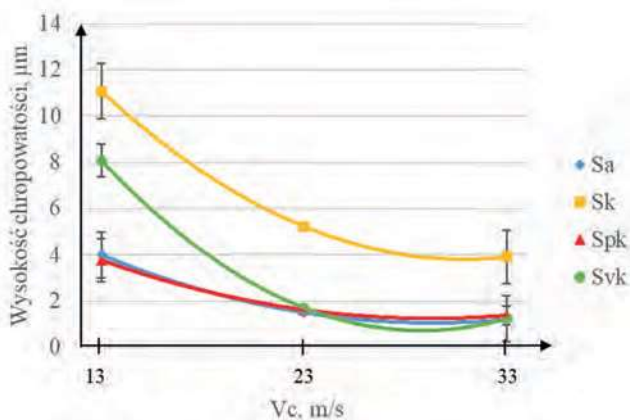


Fig. 3. Dependence of the roughness height after grinding of Inconel 625 on the cutting speed V_c

Rys. 3. Zależność wysokości chropowatości po obróbce szlifowaniem Inconelu 625 od prędkości skrawania V_c

Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę wpływu głównego technologicznego parametru procesu szlifowania, jakim

jest prędkość skrawania na wybrane parametry opisujące powierzchnią krzywą udziału nośnego i cechy morfologii uzyskanej powierzchni. Przedstawione wyniki wskazują na występowanie lokalnego optimum, dla którego wzrost prędkości skrawania nie powoduje istotnej zmiany cech funkcjonalnych powierzchni. Praca w warunkach lokalnego optimum może prowadzić do istotnego obniżenia zużycia ściernicy, przy jednoczesnym uzyskaniu pożądanych cech funkcyjnych obrabianych powierzchni.

Otrzymano: 30-09-2024

Zrecenzowano: 25-10-2024

Zaakceptowano: 29-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

[1] T. Sałaciński, A. Przesmycki, T. Chmielewski, *Appl. Sci.* 2020, **10**, nr 10, 3420, doi: 10.3390/app10103420.

- [2] N. Szczotkarz, R. Mrugalski, R.W. Maruda i in., *Tribol. Int.* 2021, **156**, 106813, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106813.
- [3] A. Hamrol, O. Ciszak, S. Legutko, M. Jurczyk (red.), *Advances in manufacturing*, Springer, 2017.
- [4] G.M. Krolczyk, J.B. Krolczyk, R.W. Maruda, S. Legutko, M. Tomaszewski, *Measurement* 2016, **88**, 176, doi: 10.1016/j.measurement.2016.03.055.
- [5] P. Kołodziejczak, M. Bober, T. Chmielewski, *Appl. Sci.* 2022, **12**, nr 9, 4568, doi: 10.3390/app12094568.
- [6] Y. Huang, G. Liu, G. Xiao, J. Xu, *Mater. Manuf. Process.* 2023, **38**, nr 7, 888, doi: 10.1080/10426914.2022.2116042.
- [7] A. Kopytowski, R. Świercz, D. Oniszczuk-Świercz, J. Zawora, J. Kuczak, Ł. Żrodowski, *Materials* 2023, **16**, nr 2, 716, doi: 10.3390/ma16020716.
- [8] S. Legutko, *Ekspluat. Niezawod.* 2009, nr 2, 8.
- [9] R. de Souza Ruzzi, R.L. de Paiva, L.R.R. da Silva, A.M. Abrão, L.C. Brandão, R.B. da Silva, *Tribol. Int.* 2021, **158**, 106919, doi: 10.1016/j.triboint.2021.106919.
- [10] L.M. Hlaváč, D. Krajcarz, I.M. Hlaváčová, S. Spadlo, *Precision Eng.* 2017, **50**, 148, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.05.002.
- [11] K. Kishore, M.K. Sinha, S.R. Chauhan, *J. Manuf. Process.* 2023, **97**, 87, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.04.053.
- [12] Gołąbczak M., Świącik R., Gołąbczak A., Kaczmarek D., Dębowski R., Tomczyk B., *Materials* 2021, **14**, nr 22, 6773, doi: 10.3390/ma14226773.
- [13] M.C. Salcedo, I.B. Coral, G.V. Ochoa, *Contemp. Eng. Sci.* 2018, **11**, nr 68, 3397, doi: 10.12988/ces.2018.87319.

W ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki
Rozwój czasopism naukowych
czasopismo
ochrona przed korozją
realizuje projekt RCN/SN/0650/2021/1²

40 punktów MEiN
Journal Impact Factor: **0,2**



Serdecznie zapraszamy autorów do nadsyłania artykułów z obszaru korozji i ochrony przed korozją. Zakwalifikowane do druku prace zostaną bezpłatnie przetłumaczone na język angielski. Zapewniamy szybki termin publikacji.

Czasopismo „Ochrona przed Korozją” publikuje artykuły naukowe w Otwartym Dostępie.

<https://www.sigma-not.pl/czasopisma-40-ochrona-przed-korozja.html>
<https://ochronapredkorozja.pl/>