Wpływ rodzaju ziarna ściernego nowej generacji na chropowatości powierzchni inconelu 718

The influence of the type of new generation abrasive grain on the state of the surface layer of Inconel 718

RADOSŁAW ROSIK
RYSZARD WÓJCIK
ANNA GRDULSKA *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.385

W artykule przedstawiono fragment badań wpływu procesu szlifowania ściernicą Quantum na wybrane właściwości WW. Eksperyment obejmował pomiary sił składowych skrawania, parametry chropowatości oraz topografię powierzchni w układzie 2D i 3D. Zastosowano płyn chłodząco-smarujący w postaci mgły olejowej podawany z minimalnym wydatkiem w strefę szlifowania (MQL). Wykorzystanie tej metody wpłynęło na spadek wartości sił składowych F_n i F_t oraz zmniejszenie wartości chropowatości warstwy wierzchniej (WW).

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, siły szlifowania, chropowatość powierzchni, materiał ścierny, stop niklu 718

The paper presents the part of the research on the influence of abrasive tool Quantum on the selected parameters of the surface layer. The experiment included the measurement of grinding forces and surface roughness parameters and surface topography in the 2D and 3D system. An application of cooling method as an oil mist (MQL) resulted in decrease the value of force components Fn and Ft and improve surface roughness parameters and in consequence improving the state of the surface layer.

KEYWORDS: grinding forces, surface roughness, abrasive tool, Inconel 718

Szybki rozwój przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, morskiego oraz zbrojeniowego spowodował zwiększenie wymagań wytrzymałościowych materiałów oraz odporności na ścieranie. Nikiel i jego stopy dzięki dobrej wytrzymałości zmęczeniowej, dużej odporności termicznej, odporności na korozję i utlenianie znalazły zastosowanie w silnikach lotniczych. Najczęściej używane są do produkcji elementów silnika takich jak: komory spalania, elementy turbin - czyli elementy poddane działaniu wysokich temperatur [6,9].

Ze względu na swoje właściwości podczas obróbki stopów niklu przy niskich wydajnościach procesu szlifowania bardzo często tworzą się przypalenia powierzchni czy odkształcenia plastyczne [2,8]. Niska przewodność cieplna stopów niklu powoduje znaczny wzrost temperatury w strefie szlifowania. Wysoka temperatura podczas obróbki ma ujemny wpływ na właściwości zmęczeniowe obrabianego materiału [4,5]. Największym problemem podczas obróbki stopów na bazie niklu jest szybkie zalepianie się czynnej powierzchni ściernicy (CPS) [15].

Zastosowanie metody MQL, czyli podawanie PCS z minimalnym wydatkiem (do 50 ml/h) powoduje zmianę konfiguracji smarowania w strefie styku ściernica-przedmiot obrabiany. Metoda MQL jest dość intensywnie rozwijana w ostatnich latach. Pozwala ponadto znacznie ograniczyć ilość podawanego płynu w porównaniu do powszechnie stosowanych klasycznych metod chłodzenia, w tym zalewowych, pozwala na zmniejszenie kosztów związanych z zakupem i recyklingiem płynów. Ogranicza ilość szkodliwych oparów wdychanych podczas pracy szlifierza, co działa na korzyść dla zdrowia operatora maszyny [11,14].

Warunki badań

Badania realizowano na szlifierce do płaszczyzn firmy Jotes typu SPD-30b, z wykorzystaniem ściernicy klasy premium Quantum 2NQ60JVS3 ze spoiwem ceramicznym nowej generacji Vitrium[3]. Udział ziarna ściernego obejmuje 20% Quantum, 80% elektrokorundu szlachetnego. Wykorzystane ziarna są wielkości 60 i średniej twardości (J). Do podawania płynu chłodząco - smarującego podawanego w

* dr inż. Radosław Rosik (radek.rosik@p.lodz.pl)
dr hab. inż. Ryszard Wójcik, prof. PŁ (ryszard.wojcik@p.lodz.pl)
mgr inż. Anna Grdulska (anna.grdulska@gmail.com)

obszar skrawania z minimalnym wydatkiem, zastosowano MQL'a firmy Ecolubric.

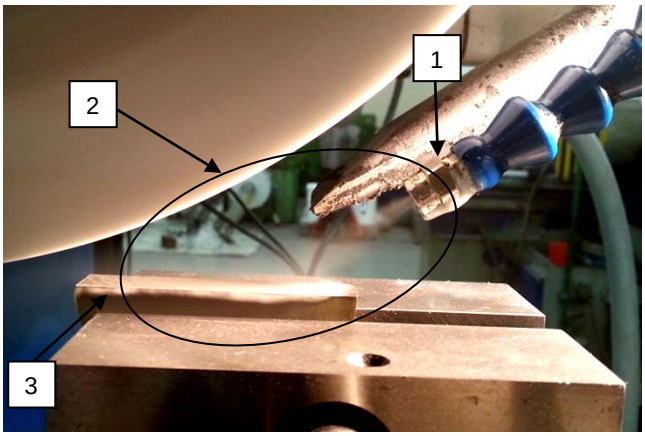
Zakres badań obejmował szlifowanie wgłębne próbek płaskich wykonanych ze stopu niklu 718, w tabeli 1 podano dokładny skład. Szlifowanie realizowano z następującymi parametrami nastawnymi:

- prędkość posuwu przedmiotu v_w = 0,2 m/s
- głębokość szlifowania a_{p1} = 0,01 mm, a_{p2} = 0,02 mm
- prędkości szlifowania: v_{s1} = 17 m/s.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu niklu 718

	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co
w %	55	21	5,5	3,3	1,15	0,8	0,8
Fe	Mn	Si	Cu	C	P	S	B
reszta	0,3	0,3	0,3	0,08	0,015	0,015	0,006

Proces szlifowania realizowano w następujący sposób: szlifowanie na sucho oraz z wykorzystaniem płynu chłodząco – smarującego Ecolubric E200L dedykowanego do metody MQL, podawanego w strefę skrawania z minimalnym wydatkiem. Dysza wysokociśnieniowa została zamocowana pod kątem 45° w takiej odległości, aby mgła olejowa pokrywała całą powierzchnie szlifowanej próbki a przepływ nie był zakłócany przez poduszkę powietrzną generowaną poprzez obracającą się ściernicę w strefie skrawania. Wydatek cieczy obróbkowej wynosił 30ml/h przy ciśnieniu p = 6bar (rys.1).



Rys. 1. Sposób podawania mgły olejowej: 1 - dysza wysokociśnieniowa, 2- obszar mgły olejowej, 3 - szlifowana próbka.

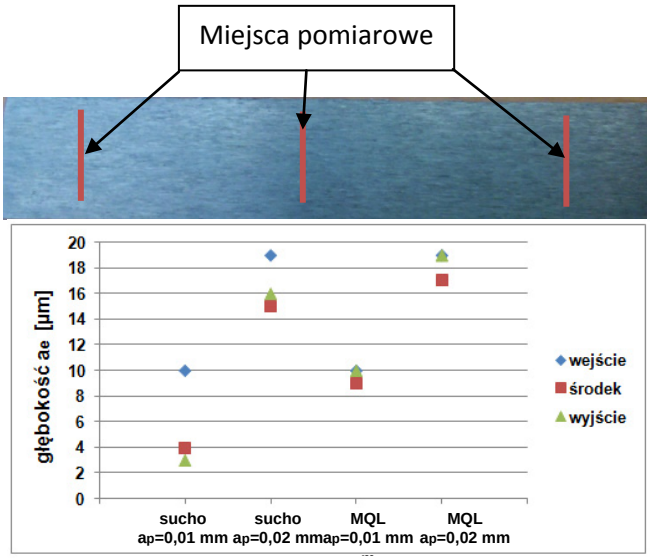
Do pomiaru składowych sił skrawania wykorzystano siłomierz piezoelektryczny firmy Kistler. Rejestracja wyników odbywała się z częstotliwością próbkowania 1000 Hz. Dokładnie stanowisko zostało opisane w artykule [10]. Do pomiaru topografii przestrzennej powierzchni (3D) wykorzystano profilografometr firmy Hommel model TurboWaveline60 z igłą diamentową o promieniu r_{tip} = 5 µm.

Ocenę cech stereometrycznych chropowatości przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie załączone przez producenta HomelMap 4.1.Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione w artykule [10].

Wyniki badań

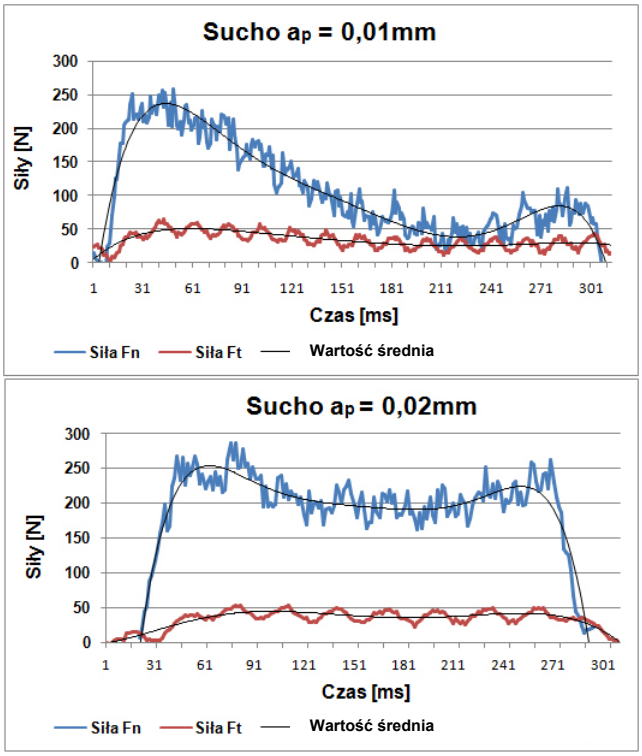
■ Wpływ podawania płynu PCS z minimalnym wydatkiem na wartości składowych sił

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych obserwowano, jak wpływa podawanie płynu chłodząco-smarującego z minimalnym wydatkiem na wartości składowych sił skrawania: stycznej F_t i normalnej F_n. Na rys.4 i 5 przedstawiono zarejestrowane przebiegi składowych sił uzyskane podczas procesu szlifowania próbek ściernicą premium Quantum Vitrum[3] bez udziału cieczy oraz z udziałem płynu chłodząco-smarującego Ecolubric E200L podawanego z minimalnym wydatkiem (metoda MQL). Analizując przebiegi sił można stwierdzić, że podczas szlifowania stopu niklu 718 z udziałem PSC z prędkością v_s = 17 m/s, v_w = 0,2 m/s z wykorzystaniem dwóch głębokości szlifowania a_p = 0,01 mm i 0,02 mm, zarejestrowano mniejsze siły o powtarzalnych przebiegach. Natomiast w przypadku obróbki z udziałem MQL'a średnia wartość składowej normalnej F_n dla głębokości a_p = 0,01 mm wyniosła 140 N, zaś przy głębokości a_p = 0,02 mm wzrosła do 200 N. Natomiast dla głębokości a_p = 0,01 mm, średnia wartość składowej stycznej F_t wyniosła 13 N, a dla a_p = 0,02 mm 26 N. Podczas obróbki bez udziału PCS wartości składowych sił są zmienne, linia trendu znacznie odbiega od linii prostej. W trakcie procesu szlifowania generowane są wysokie temperatury w strefie szlifowania powodujące zmiany strukturalne, które wprowadzają odkształcenia materiału [13]. Podczas obróbki na sucho średnia wartość składowej normalnej F_n dla głębokości a_p = 0,01 mm wyniosła 106 N, a dla a_p = 0,02 mm 190 N. W przypadku składowej stycznej, przy głębokości a_p = 0,01 mm średnia wartość wyniosła 33 N, natomiast dla a_p = 0,02 mm 42 N. Zmienność wartości sił F_n spowodowane jest nierównomiernym usuwaniem naddatku na długości szlifowanej próbki, rys.3.

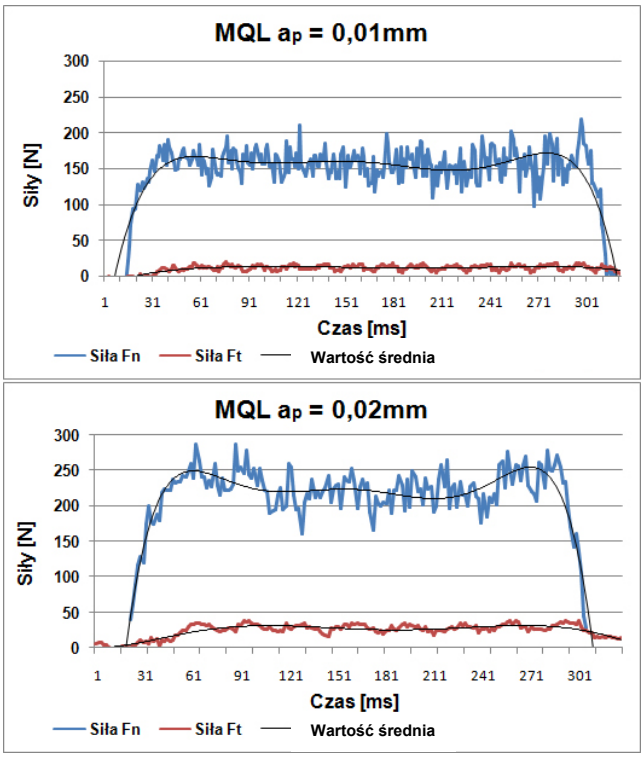


Rys. 3. Rozkład rzeczywistego naddatku z procesu szlifowania

Na rys.3 przedstawiono wyniki pomiaru rzeczywistej głębokości szlifowania stopu niklu 718 w trzech obszarach próbki: na początku, w środku i końcu. Dokładna metodyka pomiaru została zaprezentowana w artykule [10]. Najbardziej powtarzalne wyniki rzeczywistej głębokości szlifowania a_e uzyskano przy podawaniu PCS z minimalnym wydatkiem. Natomiast w procesie szlifowania bez PCS, rzeczywista głębokość była zmienna na długości próbki. Można wywnioskować, że obróbka na sucho nie jest wskazana dla procesu szlifowania stopu niklu 718 ściernicą Quantum Vitrium[3].



Rys. 4. Przebieg składowych sił szlifowania bez udziału PCS: a) a_p = 0,01 mm, b) a_p = 0,02 mm



Rys. 5. Przebieg składowych sił szlifowania z wykorzystaniem metody MQL: a) a_p = 0,01 mm, b) a_p = 0,02 mm

■ Wpływ podawania płynu PCS z minimalnym wydatkiem na chropowatość powierzchni

W dalszej części badań doświadczalnych analizowano, zachowania parametrów chropowatości powierzchni (Ra, Rz, Rmax) po obróbce na sucho oraz udziałem PCS. Na powierzchni próbki dokonano kilkudziesięciu pomiarów co 1mm. Następnie dokonano analizy statystycznej. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Analiza statystyczna parametrów chropowatości

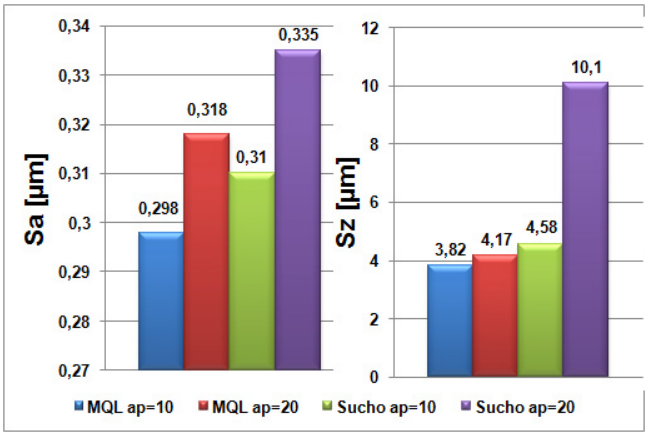
Szlifowanie na sucho na głębokości a_p= 0,01 mm					
Parametr	Średnia wartość	Rozrzut	S	Xmax	Xmin
Ra	0,39	0,20	0,04	0,50	0,30
Rz	3,31	1,76	0,42	4,32	2,56
Rmax	4,50	6,16	1,09	9,22	3,06
Szlifowanie na sucho na głębokości a_p= 0,02 mm					
Parametr	Średnia wartość	Rozrzut	S	Xmax	Xmin
Ra	0,42	0,20	0,04	0,56	0,36
Rz	3,20	1,52	0,37	4,14	2,62
Rmax	4,01	4,63	0,87	7,59	2,96
Szlifowanie przy podawaniu MQL'a na głębokości a_p= 0,01 mm					
Parametr	Średnia wartość	Rozrzut	S	Xmax	Xmin
Ra	0,39	0,09	0,02	0,430	0,34
Rz	3,06	1,01	0,261	3,53	2,53
Rmax	3,74	1,63	0,461	4,61	2,98
Szlifowanie przy podawaniu MQL'a na głębokości a_p= 0,02 mm					
Parametr	Średnia wartość	Rozrzut	S	Xmax	Xmin
Ra	0,42	0,09	0,02	0,47	0,38
Rz	3,45	1,16	0,34	4,14	2,38
Rmax	4,19	2,72	0,63	6,11	3,38

Podczas szlifowania trudnoskrawalnego stopu niklu 718 dla głębokości a_p = 0,01 mm w czasie obróbki na sucho oraz z udziałem metody MQL średnia wartość parametru chropowatości Ra była porównywalna, natomiast rozrzut wyników średniego odchylenia standardowego (S) uzyskano mniejsze o około 50% w stosunku do obróbki bez PCS. Zastosowanie PCS spowodowało kilku procentowy spadek wartości parametru chropowatości Rz i Rmax oraz dużo mniejsze odchylenie standardowe. Natomiast podczas procesu szlifowania dla a_p = 0,01 mm z udziałem PCS otrzymano bardziej powtarzalną powierzchnię warstwy wierzchniej szlifowanego detalu, co można zauważyć analizując różnice między maksymalnymi parametrami Ra, Rz i Rmax, które są przestawione w powyższej tabeli jako Xmin i Xmax. Podobnie sytuacja przedstawia się dla opisanych parametrów chropowatości przy głębokości szlifowania a_p = 0,02 mm. Średnią wartość chropowatości Ra uzyskano taką samą przy szlifowaniu na sucho, jak i z udziałem MQL. Natomiast pozostałe wartości Rz i Rmax otrzymano niższe podczas obróbki z udziałem mgły olejowej. Także rozrzut

oraz odchylenie standardowe uzyskano niższe niż przy obróbce na sucho, co więcej zarejestrowano bardziej powtarzalne wyniki badań podczas szlifowania z udziałem metody MQL.

■ Wpływ podawania płynu PCS z minimalnym wydatkiem na topografię amplitudową powierzchni

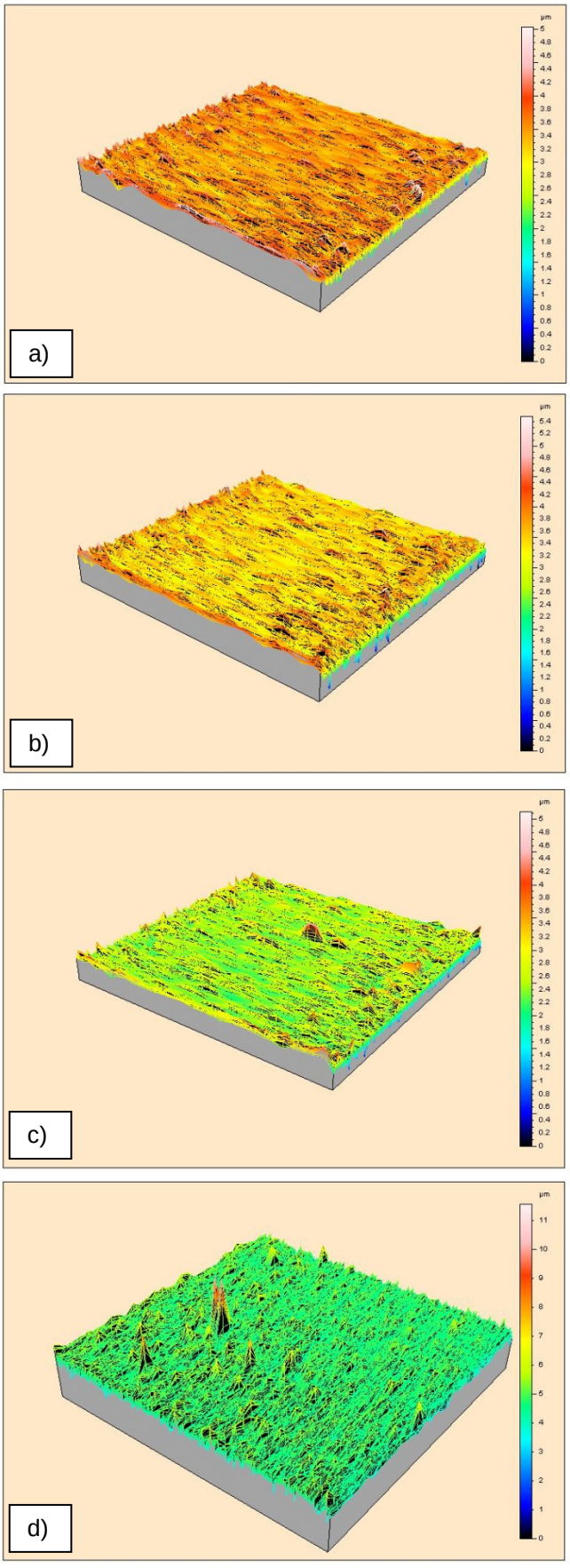
Analizując wybrane elementy charakterystyki stereometrycznej powierzchni utworzonej w procesie szlifowania stopu niklu 718 na sucho oraz podczas podawania mgły olejowej w strefę skrawania można zauważyć, że najlepszą powierzchnię uzyskano stosując minimalne smarowanie. Na rys. 7 przedstawiono porównanie wartości parametrów przestrzennych *Sa* i *Sz* dla dwóch głębokości 0,01 mm i 0,02mm przy podawaniu płynu PCS metodą MQL oraz obróbce bez udziału cieczy chłodząco-smarującej, czyli na sucho.



Rys. 6. Porównanie wartości parametrów Sa i Sz po procesie szlifowania stopu niklu 718 z użyciem PCS, oraz bez udziału PCS

Podczas szlifowania na głębokości a_p = 0,01 mm w skutek podawania mgły olejowej uzyskano bardziej gładką powierzchnię z parametrem *Sa* = 0,298 µm niż przy szlifowaniu na sucho *Sa* = 0,31 µm. Otrzymano także kilku procentowy spadek maksymalnej wysokości nierówności *Sz* w stosunku do obróbki na sucho. Natomiast przy obróbce na głębokości nastawnej a_p = 0,02 mm przy zastosowaniu metody MQL uzyskano spadek parametru *Sa* w stosunku do obróbki na sucho (Sa dla MQL wyniósł 0,31 µm, przy szlifowaniu na sucho *Sa* = 0,335 µm). Przy podawaniu oleju z minimalnym wydatkiem maksymalna wysokość nierówności *Sz* zmniejsza się prawie o 50%. Jest to znacząca różnica w stosunku do obróbki na sucho.

Na rys.7 przedstawiono topografię generowanych w procesie szlifowania z udziałem metody MQL (rys.7a, b) oraz na sucho (rys.7 c, d). Po obróbce bez udziału PCS widoczne są bardzo duże i głębokie piki, co może świadczyć, że w ściernicy nastąpiło bardzo szybkie zalepianie porów oraz słabe odprowadzenie wiórów ze strefy skrawania. Jest to bardzo niekorzystne, ponieważ przez to warstwa wierzchnia ulega zarysowaniu i uzyskuje się powierzchnię słabej jakości obrabianego materiału. Przy zastosowaniu mgły olejowej podczas szlifowania stopu niklu uzyskano bardziej jednolitą powierzchnię, bez większych wgłębień profilu. Dzięki temu warstwa wierzchnia jest lepszej jakości i nie wymaga dodatkowych operacji szlifierskich.

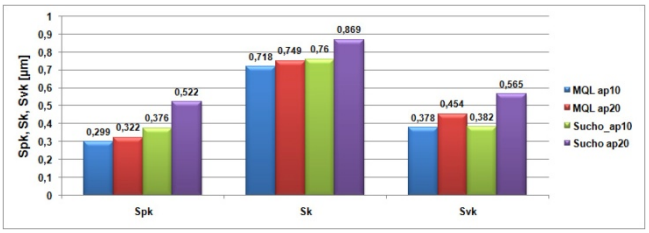


Rys. 7. Topografie powierzchni po szlifowaniu: a) na głębokości a_p = 0,01 mm z udziałem metody MQL, b) na głębokości a_p = 0,02 mm z udziałem metody MQL, c) na głębokości a_p = 0,01 mm na sucho, d) na głębokości a_p = 0,02 mm na sucho

W dalszej analizie oceniono właściwości nośne szlifowanych powierzchni, podobnie jak poprzednio z udziałem PCS i bez. Wyznacznikiem nośności powierzchni jest pięć parametrów przestrzennych, takich jak [1,3,7]:

- *Spk* - zredukowana wysokość wzniesień,
- *Sk* - zredukowana wysokość\ rdzenia,
- *Svk*- zredukowana głębokość wgłębień,
- *Sr1* - udział nośny wierzchołków,
- *Sr2* - udział nośny wgłębień.

Na rys. 8. Zestawiono i porównano wartości parametrów *Sk*, *Spk*, *Svk*.



Rys. 8. Porównanie parametrów Sk, Spk, Svk przy zastosowaniu metody MQL oraz przy szlifowaniu na sucho stopu niklu 718

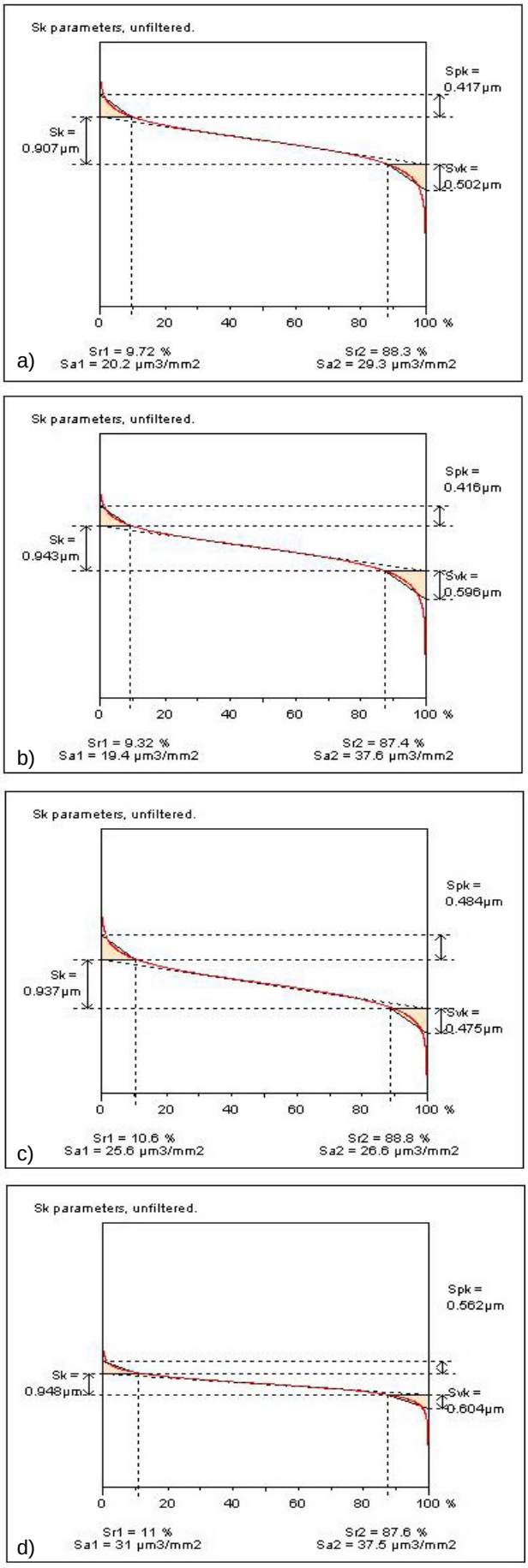
Proces szlifowania bez udziału płynu PCS powoduje wzrost parametru *Svk* (dla a_p = 0,01 mm *Svk* = 0,382 µm, dla a_p = 20 µm *Svk* = 0,565 µm), a także powoduje lepsze utrzymanie płynu w pustkach przestrzeniach wgłębień. Wizualizację rozkładu parametrów udziału materiałowego ilustruje rys.9. Na podstawie krzywych udziału materiałowego można stwierdzić, że skutkiem maksymalnej wartości parametru *Spk* = 0,522 µm jest duży udział nośny wierzchołków *Sr1* = 11%. Przy podawaniu w strefę szlifowania PCS uzyskano najmniejszą wartość parametru *Spk* = 0,299 µm, co prowadzi do minimalizacji naddatku przewidzianego w eksploatacji na docieranie i świadczy o lepszych właściwościach trybologicznych. Mała wartość parametru *Spk* wskazuje na dużą odporność powierzchni na ścieranie.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że podawanie mgły olejowej z minimalnym wydatkiem pod dużym ciśnieniem daje pozytywne efekty. Obejmują one spadek składowych sił szlifowania, są one znacznie mniejsze w stosunku do obróbki na sucho. Przy niskiej przewodności cieplnej stopu niklu, temperatura ma ujemny wpływ, a zastosowanie PCS zmniejsza wydzielanie ciepła, co wpływa pozytywnie na warstwę wierzchnią, unikamy zmian strukturalnych, przypaleń. Jest to bardzo dobrze widoczne w czasie obróbki na sucho, podczas której ciepło wprowadza zmiany strukturalne, co w konsekwencji prowadzi do zmiany rozkładu naddatku. Sytuacja taka powoduje dużą zmienność wartości sił składowych szlifowania na długości badanej próbki.

Wykorzystanie metody MQL spowodowało zmniejszenie wartości parametrów *Sa* i *Sz* .

Wykorzystanie metody MQL powinno mieć coraz większy udział przy szlifowaniu materiałów trudnoskrawalnych, w tym stopów niklu.



Rys. 9. Rozkład parametrów udziału materiałowego podczas szlifowania: a) z udziałem metody MQL dla a_p = 0,01 mm, b) z udziałem metody MQL dla a_p = 0,02 mm, c) na sucho dla a_p = 0,01 mm, d) na sucho dla a_p = 0,02 mm

LITERATURA

1. Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 2008.
2. Choudhury IA and El-Baradie MA. Machining nickel base superalloys: Inconel 718. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture1997, 212:195–206.
3. Grzesik W. "Wpływ obróbki sekwencyjnej na topografię powierzchni stali utwardzonej", Mechanik 5-6 2014, s.350-363.
4. Liu Q, Chen X and Gindy N. Investigation of acoustic emission signals under a simulativeenvironment of grinding burn. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2006; 46:284–292
5. Ming C, Xiaotian L, Fanghong S, Yucheng X and Bingyuan X. Studies on the grinding characteristicsof directionally solidified nickel-based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology* 2001;116(2-3): 165–169.
6. Nickel Development Institute. Machining nickel alloys. Reference book, Series N° 11 008, http://www.nickelinstitute.org/en/TechnicalLiterature/Reference%20Book%20Series/11008_MachiningNickelAlloys.aspx (2002, accessed 7 January 2015).
7. Oczoś K.E., Liubimov V., Struktura geometryczna powierzchni, Oficyna Wyd. PRz, Rzeszów 2003.
8. Osterle W. and Li PX. Mechanical and thermal response of a nickel-base super alloy upon grinding with high removal rates. Materials Science and Engineering: A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing) 1997; 238: 357–366.
9. Pollock TM and Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry microstructure, and properties. *Journal of Propulsion and Power* 2006; 22(2): 361–374.
10. Rosik R, Grdulska A. Wpływ prędkości szlifowania na stan warstwy wierzchniej w procesie szlifowania stopu tytanu, Mechanik 8-9 2014r (publikacja na płycie CD)
11. Rosik R., Korzeniewski H., Wybór medium obróbkowego dla MQL, a efekty szlifowania stopu tytanu Ti6Al4V. Stal nr 5-6 2014, s. 24-26.
12. SadeghiM. M., Hadad M.J., Tawakoli T., Vesali A., Emami M., "Aninvestigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steelusing minimum quantity lubrication – MQL technique". International Journal of Material Forming, 3 2010, s.241-251.
13. Wójcik R., Wpływ strumienia energii szlifowania na wybrane właściwości warstwy wierzchniej. Zeszyty Naukowe Politechnika Łódzka 2006.
14. Wójcik R., Rosik R., Badanie wpływu MQL z użyciem glikolu propylenowego na chropowatość powierzchni przedmiotu szlifowanego. Inżynieria Maszyn, Rok 15, zeszyt 4, 2010, s. 124-131.
15. Xu X, Yu Y and Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel(K417) alloys. Wear 2003; 255 1421-1426.