

Evaluation of surface roughness, dimensional and shape accuracy of Al_2O_3 ceramics in hardened state after milling

Ocena chropowatości powierzchni oraz dokładności wymiarowo-kształtowej ceramiki Al_2O_3 w stanie utwardzonym po frezowaniu

ALEKSANDER PRZESMYCKI
TADEUSZ SAŁACIŃSKI
MACIEJ WINIARSKI
RAFAŁ ŚWIERCZ
TOMASZ CHMIELEWSKI *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.109>

The effect of technological parameters of machining on surface roughness, dimensional and shape accuracy in the process of milling Al_2O_3 ceramics in hardened state was evaluated. The unique properties of ceramic materials cause more and more interest in them in various branches of industry. Ceramics in the hardened state can be processed using unconventional methods and conventional methods while maintaining the appropriate technological parameters. Ceramics cutting tests were carried out in a hardened state (face and shape milling) on a CNC milling machine using PCD tools. Geometric surface structure study and measurements of geometric dimensions were made.

KEYWORDS: Al_2O_3 milling, hardened ceramics machining, PCD tools, hard ceramics milling

Oceniono wpływ parametrów technologicznych skrawania na chropowatość powierzchni i dokładność wymiarowo-kształtową w procesie frezowania ceramiki Al_2O_3 w stanie utwardzonym. Unikalne własności materiałów ceramicznych są powodem wzrostu zainteresowania nimi w różnych gałęziach przemysłu. Ceramikę w stanie utwardzonym można obrabiać metodami niekonwencjonalnymi oraz konwencjonalnymi, z zachowaniem określonych parametrów technologicznych. Badano proces skrawania ceramiki w stanie utwardzonym (frezowania czołowego i kształtowego) na frezarce CNC narzędziami z PCD. Uwzględniono strukturę geometryczną powierzchni oraz wymiary geometryczne.

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie ceramiki Al_2O_3 , frezowanie ceramiki w stanie utwardzonym, narzędzia diamentowe, ceramika w stanie wypalonym

Wprowadzenie

Ceramiczne materiały techniczne dzięki swoim unikalnym właściwościom znajdują zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, takich jak przemysł elektryczny, chemiczny czy spożywczy. W wytwarzaniu nie tylko pełnią funkcję materiału obróbkowego, lecz także nadają się na narzędzia skrawające (płytki czy szczotki do usuwania gratu i zadziarów) [1–3]. Z ceramiki wytwarza się ochron-

ne warstwy powierzchniowe [4, 5], modyfikowane przewodzącymi powłokami metalowymi [6, 7]. Wybór materiałów ceramicznych do procesów wytwarzania zależy od ich cech fizycznych i chemicznych, od możliwości nadawania im dokładności wymiarowo-kształtowej oraz zapewnienia odpowiedniej jakości powierzchni.

Do podstawowych utrudnień przy obróbce ubytkowej materiałów ceramicznych należą ich większa kruchość oraz twardość w porównaniu z materiałami metalowymi [16, 17]. W trakcie obróbki większa kruchość materiałów ceramicznych przejawia się występowaniem wykruszeń na krawędziach, natomiast większa twardość skutkuje ograniczoną liczbą narzędzi nadających się do obróbki [8].

W ostatnim czasie najpopularniejszymi metodami obróbki ubytkowej materiałów ceramicznych są: obróbka elektroerozyjna, obróbka ścierna oraz obróbki wspomagane laserem (LAM – *laser aided manufacturing*) [9, 14, 15].

Przeprowadzono ocenę parametrów technologicznych w obróbce frezarskiej na maszynie CNC. Wcześniejsze badania potwierdziły potrzebę obróbki materiałów ceramicznych z użyciem frezarki CNC.

Badania

W badaniach wykorzystano tlenek glinu (Al_2O_3) o czystości 99% i 97% (rys. 1a) w stanie utwardzonym (po wypaleniu). Wybór tego rodzaju ceramiki był podyktowany powszechnością jego stosowania w przemyśle z racji jego wysokiej wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości termicznej, odporności na czynniki chemiczne i korozję oraz izolacji elektrycznej [10].

Badania przeprowadzono na pionowym centrum frezarskim Cincinnati Arrow 500. Materiał ceramiczny miał postać walca o średnicy od $\varnothing 8$ do $\varnothing 15$ mm i wysokości 30 mm. Obrabiane próbki były mocowane w uchwycie czteroscześkowym (rys. 1b), przykręconym do stołu obrabiarki. Wykonano próby frezowania czołowego oraz frezowania kształtowego.

Mgr inż. Aleksander Przesmycki, aleksander.przesmycki@pw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4380-2006> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska
Dr hab. inż. Tadeusz Sałaciński prof. PW, tadeusz.salacinski@pw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3617-8770> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska
Mgr inż. Maciej Winiarski, <https://orcid.org/0000-0002-4853-1869> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska
Dr inż. Rafał Świercz, rsw@meil.pw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2190-9726> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska
Dr hab. inż. Tomasz Chmielewski prof. PW, <https://orcid.org/0000-0003-0002-8751> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

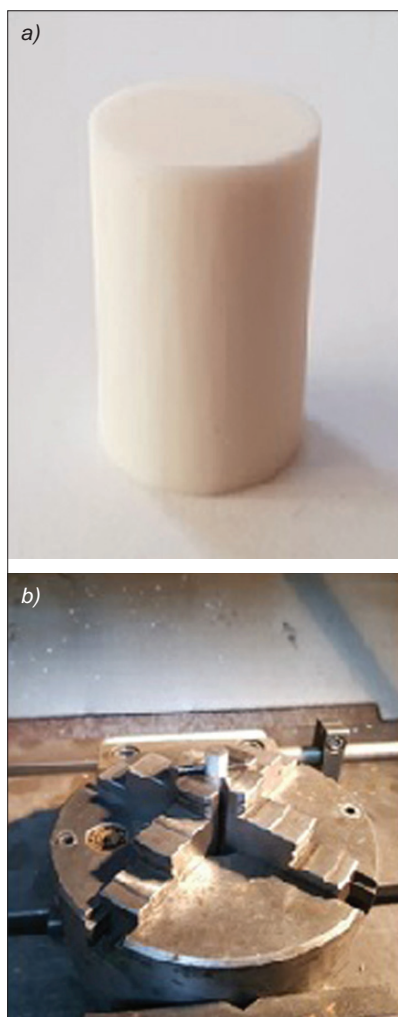


Fig. 1. Ceramic material Al_2O_3 : a) as a cylinder, b) as a material mounted in a four-jaw holder
Rys. 1. Materiał ceramiczny Al_2O_3 : a) w postaci walca, b) materiał zamocowany w uchwycie czteroszczękowym

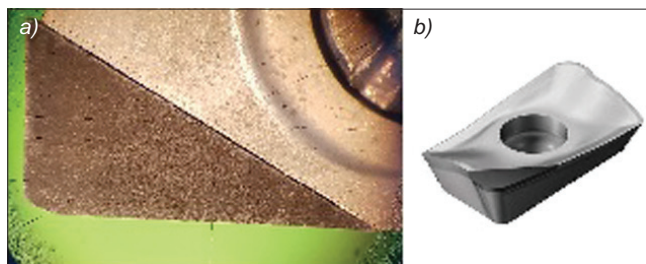


Fig. 2. PCD10 cutting insert: a) microscopic view of the insert corner, b) insert visualization [12]
Rys. 2. Płytkę skrawającą PCD10: a) widok mikroskopowy naroża płytki, b) wizualizacja płytki skrawającej [12]

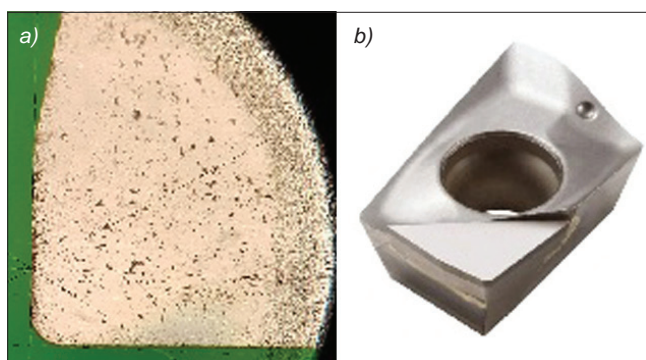


Fig. 3. PCD05 cutting insert: a) microscopic view of the insert corner, b) insert visualization [13]
Rys. 3. Płytkę skrawającą PCD05: a) widok mikroskopowy naroża płytki, b) wizualizacja płytki skrawającej [13]

W badaniach użyto narzędzi skrawających różnych producentów, wyposażonych w płytkę skrawającą z narożem z diamentu polikrystalicznego (PCD). Pierwsze narzędzie oznaczono jako PCD10, drugie – jako PCD05. Przed wykonaniem badań zdecydowano o zamocowaniu jednej płytki PCD w narzędziu oraz drugiej płytki – z zeszlifowanym narożem – jako przeciwwagi. W obu przypadkach były to płytki skrawające z narożem z diamentu polikrystalicznego.

Narzędzie PCD10 miało krawędź natarcia o długości 2,2 mm oraz część skrawającą o wysokości efektywnej 4 mm, grubość warstwy PCD wynosi 0,625 mm (rys. 2a i b). W przypadku narzędzia PCD05 długość krawędzi skrawającej wynosiła 2,4 mm, wysokość efektywna części skrawającej wynosiła 6,5 mm, natomiast warstwa PCD miała grubość 0,82 mm (rys. 3 a i b).

Wyniki badań

Narzędziem PCD10 frezowano powierzchnie czołowe półfabrykatów z różnymi parametrami obróbki. W tabl. I znajdują się parametry chropowatości powierzchni przed obróbką i po niej.

Zbadano topografię powierzchni czołowej próbek profilometrem Form Talysurf Series 2 Taylor Hobson. Na rys. 4 zaprezentowano wyniki analizy chropowatości z badania struktury geometrycznej powierzchni próbki 2b. W każdym przypadku chropowatość warstwy wierzchniej została polepszona względem chropowatości powierzchni po cięciu, przed obróbką.

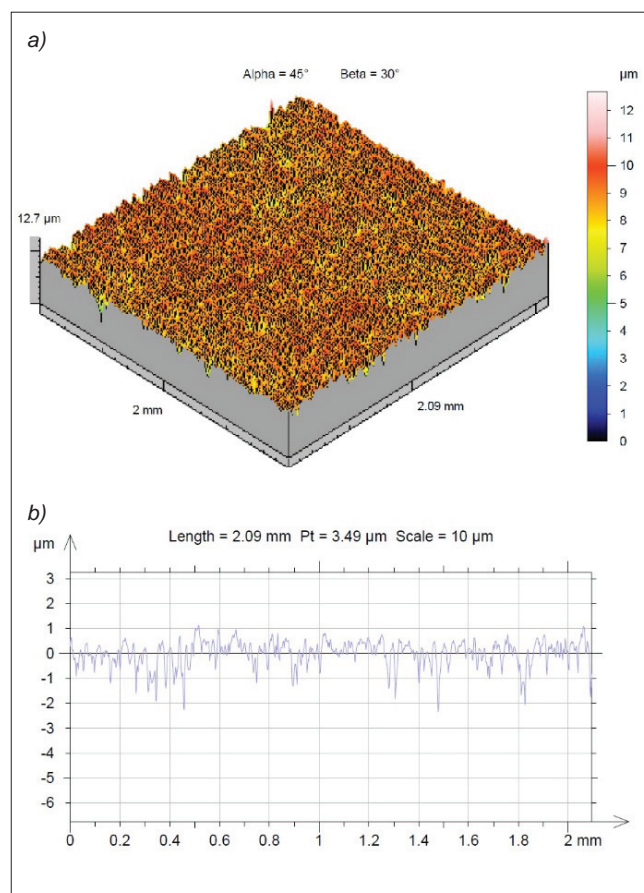


Fig. 4. Example of surface roughness analysis (sample 2b): a) stereometric picture of the surface, b) surface profilograph ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,075$ mm/rev, $a_p = 0,05$ mm)
Rys. 4. Przykładowa analiza chropowatości powierzchni (próbki 2b): a) obraz stereometryczny powierzchni, b) profilograf powierzchni ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,075$ mm/obr, $a_p = 0,05$ mm)

TABLE I. Surface roughness parameters depending on the applied machining parameters of the PCD10 tool

TABLICA I. Parametry chropowości powierzchni w zależności od zastosowanych parametrów obróbki narzędziem PCD10

Frezowanie czołowe					Chropowość po obróbce	
Numer narzędzia	Próbka	Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw na ostrze f_z [mm/obr]	Osiowa głębokość skrawania a_p [mm]	Ra [μ m]	Rz [μ m]
1	1a	120	0,05	0,05	0,493	4,83
2	1b	60	0,05	0,05	0,337	2,99
3	2a	180	0,05	0,05	0,622	4,66
4	2b	120	0,075	0,05	0,377	2,91
5	3a	120	0,025	0,05	0,325	2,59

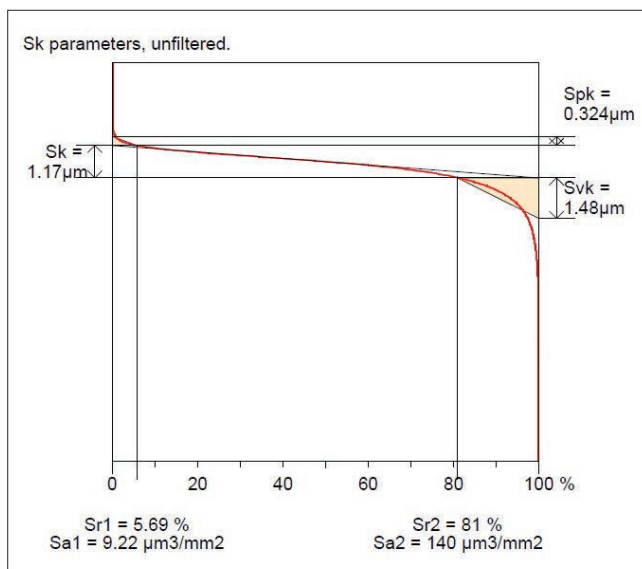


Fig. 5. Load-capacity curve for sample 1a
Rys. 5. Krzywa nośności dla próbki 1a

TABLE II. Selected parameters of the load-capacity curve of the samples

TABLICA II. Wybrane parametry krzywej nośności próbek

Próbka	v_c [m/min]	f_z [mm/obr]	a_p [mm]	Spk [μ m]	Svk [μ m]	Sa [μ m]	Sz [μ m]
1a	120	0,05	0,05	0,324	1,48	0,569	9,55
1b	60	0,05	0,05	0,288	1,12	0,417	10,6
2a	180	0,05	0,05	0,385	1,09	0,445	7,32
2b	120	0,075	0,05	0,37	1,51	0,596	9,55
3a	120	0,025	0,05	0,304	1,28	1,1	10,7

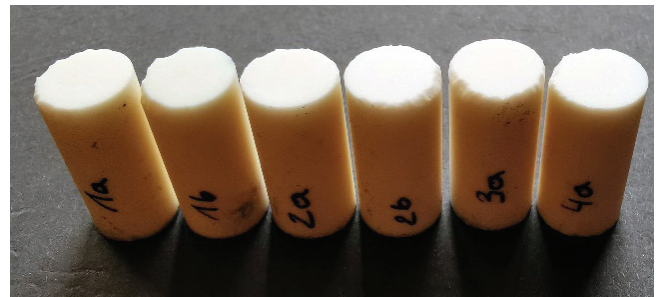


Fig. 6. The front surface area of samples made of Al_2O_3 after machining with different technological parameters

Rys. 6. Powierzchnie czołowe próbek z Al_2O_3 po obróbce z różnymi parametrami technologicznymi

Na rys. 5 znajduje się wykres udziału nośnego powierzchni w próbce 1a. Nośność powierzchni opisują następujące parametry [6]:

- Spk – zredukowana wartość wzniesień [μ m],
- Sk – zredukowana wysokość rdzenia [μ m],
- Svk – zredukowana wysokość wgłębień [μ m],
- Sr1 – udział nośny wierzchołków [%],
- Sr2 – udział nośny wgłębień [%].

Parametr Spk pozwala na ocenę odporności powierzchni na ścieranie. Im niższa jego wartość, tym większa odporność na ścieranie. Parametry Svk i Sr2 dostarczają informacji na temat własności smarnych powierzchni (utrzymywania płynu przez powierzchnie ślizgowe). Z kolei niska wartość parametru Sk świadczy o możliwości wytrzymywania dużych obciążeń mechanicznych, co potwierdza duża różnica pomiędzy parami Sr2 i Sr1, wskazująca na dużą nośność powierzchni [11]. W tabl. II zestawiono parametry krzywej nośności dla wybranych próbek.



Fig. 7. Sample made with PCD05 tool ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.05$ mm)

Rys. 7. Próbką wykonaną narzędziem PCD05 ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,05$ mm)

Próbki po frezowaniu czołowym pokazano na rys. 6. Podczas obróbki powierzchni czołowej w momencie wyjścia narzędzia z materiału można było zaobserwować odpryski materiału na jego krawędziach.



Fig. 8. Sample made with PCD10 tool ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.05$ mm)
Rys. 8. Próbkę wykonaną narzędziem PCD10 ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,05$ mm)



Fig. 9. Sample made with PCD05 tool ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.05$ mm)
Rys. 9. Próbkę wykonaną narzędziem PCD05 ($v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,05$ mm)

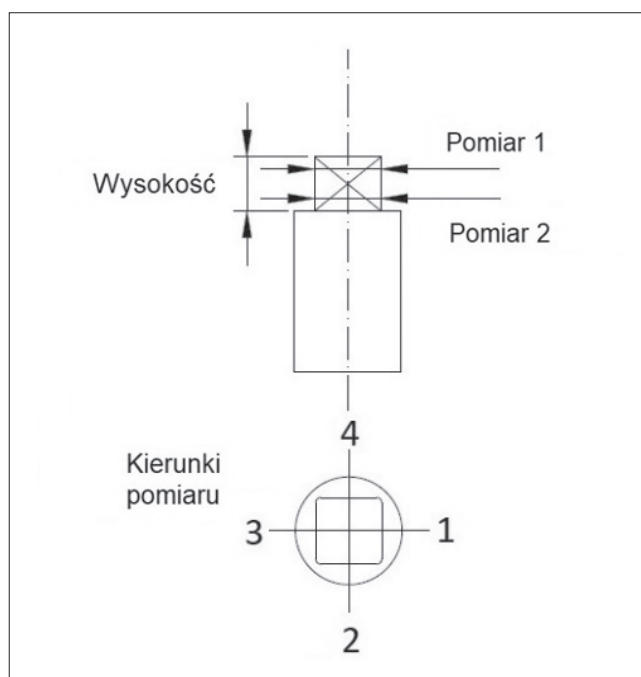


Fig. 10. Diagram of measurements of cubes made of Al_2O_3 ceramics (99%) in the hardened state
Rys. 10. Schemat pomiarów sześcianów wykonanych z ceramiki Al_2O_3 (99%) w stanie utwardzonym

TABLE III. Dimensions of the specimen after milling the cube with the PCD 05 tool

TABLICA III. Wymiary próbek po frezowaniu sześcianu narzędziem PCD 05

Próbka wykonana narzędziem PCD 05			
$v_c = 120$ m/min	$f_z = 0,05$ mm/obr		$a_p = 0,05$ mm
	Kierunek 1–3	Kierunek 2–4	Wysokość
Wymiar nominalny	6 mm	6 mm	6 mm
Pomiar 1	5,960 mm	5,939 mm	6,05 mm
Pomiar 2	5,978 mm	5,965 mm	
Różnica wymiarowa	0,018 mm	0,026 mm	0,05 mm

TABLE IV. Dimensions of the samples after milling the cube shape with the PCD10 tool

TABLICA IV. Wymiary próbek po frezowaniu sześcianu narzędziem PCD10

Próbka wykonana narzędziem PCD 10			
$v_c = 120$ m/min	$f_z = 0,05$ mm/obr		$a_p = 0,05$ mm
	Kierunek 1–3	Kierunek 2–4	Wysokość
Wymiar nominalny	6 mm	6 mm	6 mm
Pomiar 1	5,985 mm	5,950 mm	6,05 mm
Pomiar 2	5,990 mm	5,975 mm	
Różnica wymiarowa	0,015 mm	0,025 mm	0,05 mm

W przypadku obróbki powierzchni o zadanym kształcie zdecydowano się na wykonanie dwóch sześcianów (rys. 7 i 8) oraz ostrosłupa o kwadratowej podstawie (rys. 9).

Podczas frezowania pierwszego sześcianu (rys. 7) nie odnotowano wykruszeń materiału na krawędziach w przeciwieństwie do przebiegu obróbki drugiego sześcianu (rys. 8). W pierwszym przypadku materiał był wysunięty 6 mm ponad szczęki, w drugim przypadku materiał był wysunięty 10 mm ponad szczęki. Pojawienie się wykruszeń mogło być spowodowane drganiami materiału w uchwycie obróbkowym.

Po obróbce kształtowej próbki zostały poddane pomiarom na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Accura 7 firmy Zeiss. Na rys. 10 zaprezentowano schemat pomiarów, wyniki pomiarów znajdują się w tabl. III i IV.

Czas obróbki pierwszej oraz drugiej próbki wynosił 1 h i 10 min. W obu przypadkach odnotowano pojawienie się jedynie wykruszeń na powierzchni natarcia w płytkach skrawających. W związku z tym należy się zastanowić nad poprawnym określeniem pasma zużycia narzędzia.

Podczas frezowania próbki w kształcie ostrosłupa nastąpiło wyłamanie naroża z płytki PCD oraz katastroficzne stępienie ostrza. W przypadku trzeciej próbki (rys. 9) czas pracy narzędzia do momentu wyłamania naroża wynosił ok. 1 h i 40 min. Do wykonania każdej obróbki kształtowej używano nowej płytki skrawającej.

Podsumowanie

Przeprowadzone próby skrawania wykazały skuteczność stosowania ostrzy z polikrystalicznego diamentu w obróbce ceramiki. Uzyskane wartości parametru chropowatości rzędu $Ra = 0,3 \div 1,2 \mu\text{m}$ świadczą o wysokiej jakości struktury geometrycznej powierzchni. Sposób mocowania półfabrykatu wpływa na stabilność obróbki materiału. Należy stosować mały wysięg półfabrykatu ponad powierzchnię mocowania, co zmniejsza drgania półfabrykatu. Dodatkowo brak odkształceń plastycznych materiału ceramicznego powoduje konieczność zastosowania innego typu mocowania, np. miękkich szczęk lub tulejek zaciskowych. Na skutek drgań półfabrykatu podczas wychodzenia narzędzia z frezowanego materiału pojawiają się wykruszenia na krawędziach tego materiału. Pierwsze próby frezowania pozwalają na wstępne określenie zalecanych przedziałów wartości technologicznych parametrów skrawania dla ceramiki Al_2O_3 w stanie utwardzonym ($v_c = 100 \div 200 \text{ m/min}$, $f_z = 0,025 \div 0,075 \text{ mm/obr}$, $a_p = 0,05 \text{ mm}$).

LITERATURA

- [1] Sałaciński T., Winiarski M., Chmielewski T., Świercz R. "Surface finishing using ceramic fiber brush tools". *METAL 2017: 26th International Conference on Metallurgy and Materials Brno*. (2017): 1220–1226.
- [2] Sałaciński T., Winiarski M., Przesmycki A., Świercz R., Chmielewski T. „Applying titanium coatings on ceramics surfaces by rotating brushes”. *METAL 2018: 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno*. (2018): 1175–1180.
- [3] Sałaciński T., Chmielewski T., Winiarski M., Cacko R., Świercz R. "Roughness of metal surface after finishing using ceramic brush tools". *Advances in Materials Science*. 18, 1 (2018): 20–27, <https://doi.org/10.1515/adms-2017-0024>.
- [4] Czupryński A., Górka J., Adamiak M., Tomiczek B. "Testing of flame sprayed Al_2O_3 matrix coatings containing TiO_2 ". *Archives of Metallurgy and Materials*. 61, 3 (2016): 1017–1024, <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0224>.

- [5] Chmielewski T., Siwek P., Chmielewski M., Piątkowska A., Grabias A., Golański D. "Structure and selected properties of arc sprayed coatings containing in-situ fabricated Fe-Al intermetallic phases". *Metals*. 8, 12 (2018): 1059, <https://doi.org/10.3390/met8121059>.
- [6] Chmielewski M., Pietrzak K. "Metal-ceramic functionally graded materials – Manufacturing, characterization, application". *Bulletin of the Polish Academy of Science: Technical Sciences*. 64, 1 (2016): 151–160, <https://doi.org/10.1515/bpasts-2016-0017>.
- [7] Chmielewski T., Golański D., Hudycz M., Sałaciński T., Świercz R. "Surface and structural properties of titanium coating deposited onto AlN ceramics substrate by friction surfacing process". *Przemysł Chemiczny*. 98, 2 (2019): 208–213, <https://doi.org/10.15199/62.2019.2.5>.
- [8] Ocoś K. „Kształtowanie materiałów ceramicznych”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1996: 56–58.
- [9] Putyra P., Laszkiewicz-Łukasik J., Podsiadło M., Krzywdą T. „Metody kształtowania materiałów ceramicznych”. *Mechanik*. 88, 2 (2015): 120–122, <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015.2.17>.
- [10] Niezgodą T., Małachowski J., Szymczyk W. „Modelowanie numeryczne mikrostruktury ceramiki zagadnienia wybrane”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005: 33–40.
- [11] Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2008: 151–158.
- [12] <https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/products/pages/productdetails.aspx?c=r390-11t304e-p4-nl%20cd10> (dostęp: 15.04.2019).
- [13] https://www.secotools.com/article/p_02574982?section=products (dostęp: 15.04.2019).
- [14] Sosinowski Ł., Rozenek M. "High-performance electrical discharge machining of small hole in metallic ceramic composites". *Welding Technology Review*. 90, 3 (2018): 21–25.
- [15] Wypych A. "Laser creation of padding welds hard, abrasion and corrosion resistant". *Welding Technology Review*. 89, 10 (2017): 61–66, <https://doi.org/10.26628/wtr.v89i10.820>.
- [16] König W., Komanduri R., Tonshoff H.K., Ackershoff G. "Machining of hard materials". *CIRP Annals*. 33, 2 (1984): 417–427, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(16\)30164-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(16)30164-0).
- [17] Tsutsumi C., Okano K., Suto T. "High quality machining of ceramics". *Journal of Materials Processing Technology*. 37, 1–4 (1993): 639–654, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)90124-O](https://doi.org/10.1016/0924-0136(93)90124-O). ■