

# Obróbka wykończeniowa powierzchni z wykorzystaniem szczotkowych narzędzi z włókien ceramicznych

## Finishing surface using brush tools made of ceramic fiber

### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano procesy gratowania krawędzi i polerowania powierzchni z wykorzystaniem narzędzi z materiałów ceramicznych bazujących na tlenku glinu. Opisano konstrukcje podstawowych typów narzędzi oraz praktyczne przykłady zastosowania w przemyśle. Oceniono wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni obrabianej.

**Słowa kluczowe:** narzędzia skrawające; ceramiczne narzędzia szczotkowe

### Abstract

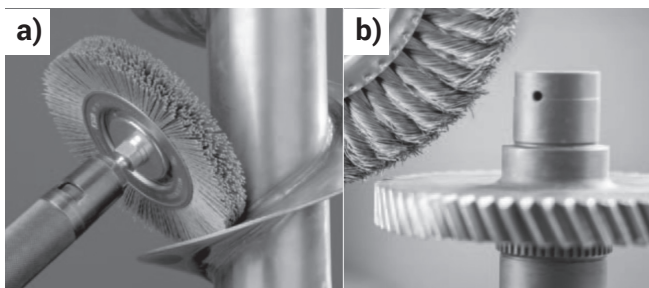
The paper describes edges deburring processes and polishing of the surface using ceramic tools based on aluminum oxide. The construction of basic types of tools and their practical industrial applications were described. The effect of machining parameters on surface roughness was evaluated.

**Keywords:** cutting tools; brush ceramic tools

### Wstęp

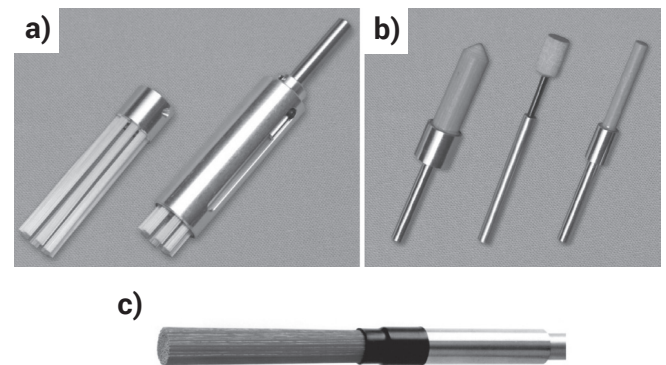
W większości przypadków obróbka metalowych przedmiotów wymaga ich odpowiedniego wykończenia. W tym celu stosuje się różne technologie m.in. szlifowanie, gratowanie czy bębnowanie. Te z kolei wymagają odrębnych maszyn i specjalistycznych narzędzi, co wiąże się z dodatkowymi kosztami dla przedsiębiorstwa. Rozwiązaniem jest końcowa obróbka na tej samej maszynie (np. obrabiarkę CNC), na której wykonano poprzednie operacje. W tym celu stosować można narzędzia obrotowe z pękami włókien wykonanych ze stali, nylonu, polipropylenu bądź materiału ceramicznego, który jest stosunkowo nowym materiałem stosowanym na tego typu narzędzia.

Poprzez zastosowanie szczotkowania powierzchni usuwa się nie tylko tłuszcze, pyły i inne zanieczyszczenia, ale również wszelkie zaadsorbowane związki i warstwy o charakterze niemetalicznym: tlenki, siarczki i inne produkty korozji [1].



**Rys. 1.** Przykłady zastosowań narzędzi typu „szczotka” z włóknami stalowymi; a) obróbka spoiny, b) gratowanie czoła koła zębatego (źródło: [5])

**Fig. 1.** Examples of use of brush type tool with steel fibres: a) machining of weld, b) chamfering of gear face (source [5])



**Rys. 2.** Podstawowe typy ceramicznych narzędzi obrotowych: a) narzędzie złożone z pęków ceramicznych włókien typu „szczotka”, b) narzędzie złożone ze zwartych i twardych brył typu „ściernica”, c) narzędzie złożone z pęków ceramicznych włókien typu „pędzel” (źródło: [3])

**Fig. 2.** Basic types of ceramic rotary tools: a) tools consisting of bunches of brush type ceramic fibres, b) tools consisting of hard and firm grinding wheel type solids, c) tools consisting of bunches of paintbrush type ceramic fibres (source [3])

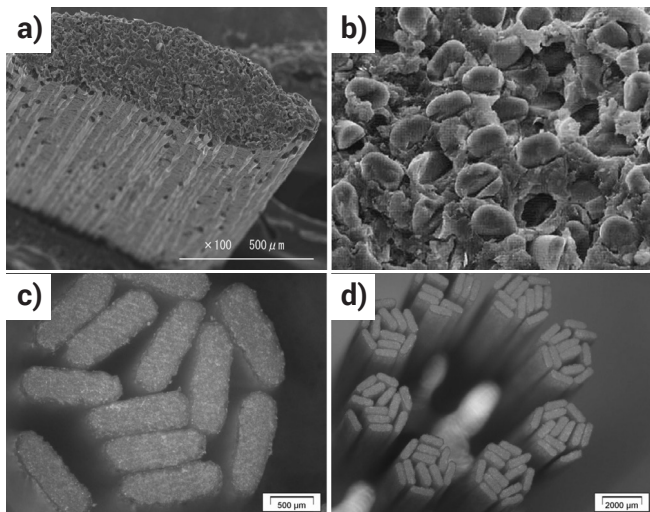
**Dr hab. inż. Tadeusz Sałaciński, prof. PW; mgr inż. Maciej Winiarski** – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: t.salacinski@upcpoczta.pl

Przykłady zastosowań narzędzi z włóknami stalowymi pokazano na rysunku 1.

Poważną wadą narzędzi stalowych bądź z tworzyw sztucznych było trwałe odkształcanie się włókien, co powodowało niską jakość powierzchni obrabianych i skutkowało krótką trwałością narzędzi. Alternatywą są narzędzia obrotowe złożone z pęków ceramicznych włókien lub zwartych i twardych brył typu „ściernica” (rys. 2). Dokładny skład materiału ceramicznego stanowi „know-how” firm produkcyjnych i nie jest dotychczas znany. Wiadomo jedynie, że głównym komponentem jest tlenek glinu  $Al_2O_3$ .

Pojedyncze włókno składa się z 1000 mikrowłókien, których średnica ma wartość kilku mikrometrów (rys. 3). Czoło każdego z 1000 mikrowłókien pracuje jako krawędź skrawająca o własnościach samoostrzących, wytrzymujących temperaturę do 150 °C. Podstawowymi własnościami włókien ceramicznych są: ich wysoka twardość, odporność na ścieranie oraz nieodkształcalność wzdłuż osi. Współcześnie stosowane narzędzia szczotkowe, przeznaczone np. do usuwania zadziorów, zbudowane ze stalowych bądź nylonowych włókien, charakteryzują się szybką utratą swojego kształtu, co skutkuje utratą własności obróbkowych.



**Rys. 3.** a) widok pojedynczego włókna [4], b) struktura włókna ceramicznego [4], c) pęk włókien, d) widok kompletnego narzędzia od strony czoła (źródło c) i d): opracowanie własne  
**Fig. 3.** a) view of a single fibre [4], b) structure of ceramic fibre [4], c) bunch of fibres, d) face view of complete tool (sources c and d: own case study)

Narzędzia ceramiczne mogą znaleźć zastosowanie do poprawiania powierzchni przed nanoszeniem powłok, wygładzania powierzchni i polerowania, szczotkowania i gratowania części po tłoczeniu, usuwania gratu po cięciu laserowym oraz elementów spiekanych, felg kół samochodowych, obróbki typu mikrofinish, zaokrąglania krawędzi, satynowania, oczyszczania powierzchni, szlifowania dekoracyjnego, usuwanie zgorzeliny, obróbki wykończeniowej okuć, przedmiotów z blach, kutych, po elektrodrażeniu, wykrawanych, listew ozdobnych i wielu innych [5].

Ze względu na stopień mechanizacji narzędzia dzieli się na:

- narzędzia do obróbki mechanicznej (obrabiarki, roboty (rys. 4) i inne maszyny ze sterowaniem numerycznym, ale także obrabiarki konwencjonalne, specjalne, zadaniowe itp.),
- narzędzia do obróbki ręcznej (diaksy, szlifierki ręczne itp.).

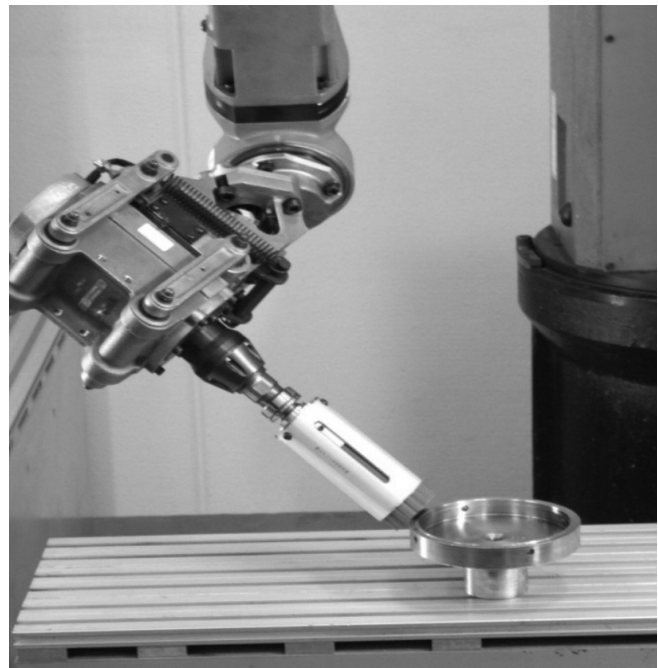
Ze względu na przeznaczenie podziału można dokonać na:

- narzędzia do powierzchni zewnętrznych (płaszczyzn i innych np. powierzchni walcowych),

- narzędzia do powierzchni wewnętrznych (w tym krzyżujących się otworów).

Kolejny podział, ze względu na cechy konstrukcyjne, klasyfikuje narzędzia w trzech grupach (rys. 2):

- narzędzia trzpieniowe typu „szczotka”,
- narzędzia trzpieniowe typu „pędzel”,
- narzędzia trzpieniowe typu „ściernica”.



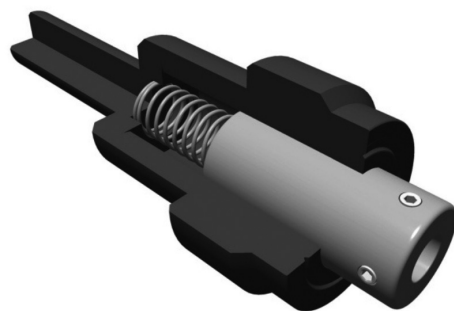
**Rys. 4.** Przykład obróbki narzędziem typu „szczotka” z wykorzystaniem robota (źródło: [4])

**Fig. 4.** Example of machining with robot using brush type tool (source [4])

	frezowanie wykończeniowe	frezowanie czołowe	odlewy, odkuwki
tworzywa sztuczne	różowy		
aluminium	czerwony		
stal	biały		
materiały trudno skrawalne	niebieski		

**Rys. 5.** Kolorystyczne oznaczenia narzędzi ze względu na ich przeznaczenie (źródło: [4])

**Fig. 5.** Color codes indicating tool use (source [4])



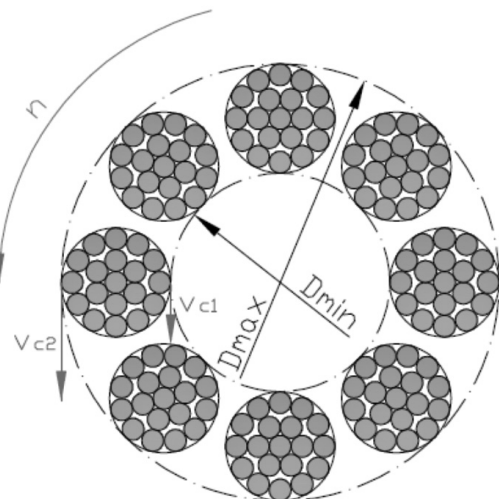
**Rys. 6.** Uchwyt kompensacyjny dla trzpieniowych narzędzi ceramicznych (źródło: [4])

**Fig. 6.** Compensating tool holder for shank ceramic tools (source [4])

Poszczególne narzędzia oznaczona się odpowiednim kolorem włókien (rys. 5). Przykładowo niebieskie wykorzystywane są do obróbki wykończeniowej przedmiotów z bardzo twardych metali, posiadają odpowiednio grubsze włókna niż szczotki różowe, które można wykorzystać do obróbki przedmiotów z tworzyw sztucznych. Na rysunku 5 pokazano kolorystyczne oznaczenia narzędzi ze względu na ich przeznaczenie w zależności od materiału obrabianego (oś pionowa) i rodzaju obróbki (oś pozioma).

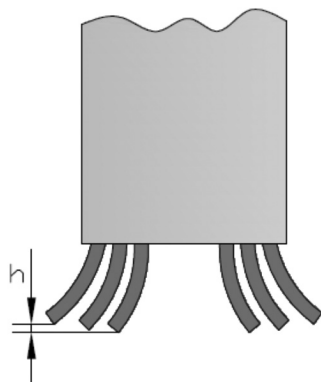
Celem skompensowania zmiany wymiaru przedmiotu obrabianego wzdłuż osi narzędzia typu „szczotka” i uzyskania stałego docisku do powierzchni obrabianej stosuje się specjalny uchwył z mechanizmem sprężynowym (rys. 6). Dzięki temu zwiększa się trwałość narzędzia i jednorodność uzyskiwanej chropowatości i faktury powierzchni obrobionej.

Szczotka garnkowa posiada włókna umiejscowione w zakresie dwóch okręgów  $D_{max}$  i  $D_{min}$  (rys. 7), stąd wynika nieco inna tekstura powierzchni obrobionej w pasie centralnym wyznaczonym przez  $D_{min}$ , oraz w dwóch pasach brzegowych wynikających ze skrajnych okręgów umiejscowienia włókien ( $D_{max}$ ). Szczotka jest narzędziem elastycznym (niesztynnym monolitem), składa się z wielu włókien, których ruch nie jest identyczny dla każdego włókna, a prędkość skrawania na średnicy zewnętrznej ( $D_{max}$ ) jest większa niż na średnicy wewnętrznej ( $D_{min}$ ). Na włókna położone przy zewnętrznej średnicy szczotki  $D_{max}$  działa



Rys. 7. Prędkości skrawania:  $v_{c1}$  i  $v_{c2}$  odpowiednio dla średnic  $D_{min}$  i  $D_{max}$  szczotki (źródło: opracowanie własne)

Fig. 7. Cutting velocities:  $v_{c1}$  and  $v_{c2}$  respectively for brush diameters  $D_{min}$  and  $D_{max}$  (source: own case study)



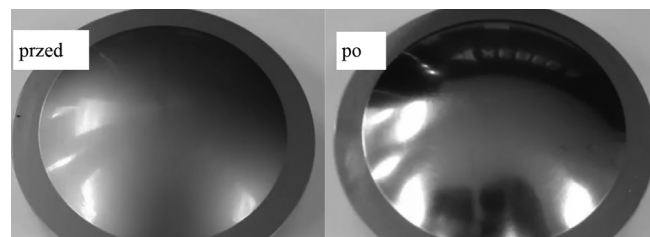
Rys. 8. Zjawisko rozchylania się włókien pod wpływem siły odśrodkowej;  $h$  – różnica rzeczywistych głębokości zanurzenia w materiale dla włókien skrajnych (źródło: opracowanie własne)

Fig. 8. Phenomenon of fibre gaping by centrifugal force:  $h$  – difference of real material dipping for peripheral fibres (source: own case study)

siła odśrodkowa o wyższej wartości niż na włókna położone bliżej osi obrotu, co powoduje ich rozchylanie się. W konsekwencji włókna położone bliżej środka obrotu zagłębiają się bardziej w materiale obrabianym niż te położone na zewnątrz (wywierają większy nacisk na powierzchnię obrabianą niż włókna skrajne, położone najdalej od osi obrotu narzędzia rys. 8). Dzieje się tak dlatego, że włókna na które działa wyższa siła odśrodkowa odchylają się mocniej względem swego położenia początkowego (położenia przy wyłączonych obrotach wrzeciona). Zjawisko rozchylania się włókien, przy założeniu identycznego odkształcenia sprężystego każdego z nich, nie zawsze jest niekorzystne. Wykorzystuje się je np. do zabiegu gratowania wewnętrznych powierzchni otworów z wykorzystaniem narzędzia typu „pędzel” (rys. 10).

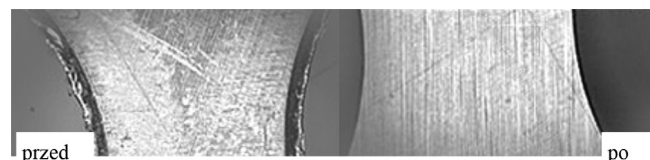
## Przykłady zastosowania narzędzi ceramicznych

Na rysunku 9 pokazano typowe zastosowania narzędzi ceramicznych typu „szczotka garnkowa” do zabiegów załamywania ostrych krawędzi, fazowania, usuwania zadziorów bądź polerowania powierzchni. Po lewej stronie występuje powierzchnia przed obróbką, zaś po prawej – po obróbce. Wyraźnie widać pozytywne efekty załamania krawędzi i poprawę chropowatości powierzchni. W opinii autorów obróbka tego typu jest bardzo wskazana do załamywania ostrych krawędzi czół zębów, zastępując żmudny zabieg frezowania.



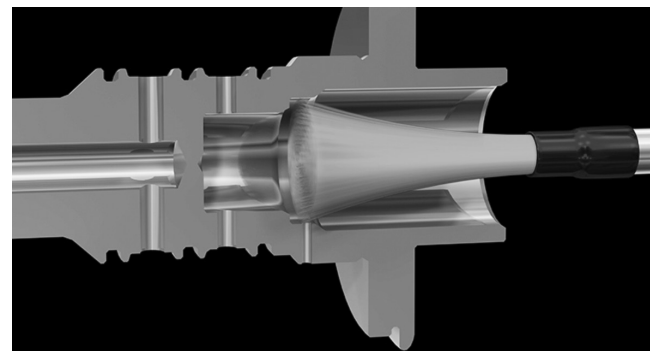
$Ra = 0.413\mu m$ ,  $Rz = 2.824\mu m$ ;

$Ra = 0.344\mu m$ ,  $Rz = 2.279\mu m$



Rys. 9. Przykłady wyników obróbki narzędziami ceramicznymi typu „szczotka”; a) obróbka powierzchni kulistej ze stali narzędziowej, b) obróbka płaszczyzny i krawędzi kanałka (źródło: [4])

Fig. 9. Examples of ceramic brush type tools machining results: a) machining of spherical surface of tool steel, b) plane and groove edge machining (source: [4])



Rys. 10. Przykład zabiegu gratowania wewnętrznych powierzchni otworów z wykorzystaniem narzędzia typu „pędzel” (źródło: [4])

Fig. 10. Example of chamfering cut of inner hole surfaces using paintbrush type tool (source: [4])

Obróbka narzędziami ceramicznymi staje się często zastąpiona w przypadku gratowania ostrych krawędzi powierzchni wewnętrznych, np. krzyżujących się otworów, bądź w przypadku powierzchni o nieregularnych kształtach. Przykład takiego zabiegu pokazano na rysunku 10. Narzędzie w postaci długiej wiązki włókien (typu „pędzel”) wykonuje ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny wzdłuż osi otworu rozszerzając się dzięki sile odśrodkowej, wskutek czego dochodzi do styku ostrzy z materiałem obrabianym.

## Wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni obrobionej

W poniższych tabelach zestawiono wyniki prób, na podstawie których dokonano oceny wpływu parametrów obróbki na chropowatość powierzchni obrobionej Ra. Zmianie podlegały wartości podstawowych parametrów technologicznych: prędkości obrotowej, głębokości skrawania i prędkości posuwu. Najlepszy wynik Ra = 0,354 µm uzyskano dla prędkości obrotowej 4000 obr./min, głębokości skrawania 0,5 mm i najmniejszej wartości posuwu 600 mm/min (tabl. I). W zakresie liczby przejść narzędzia najlepszy rezultat uzyskano w wyniku trzeciego przejścia mimo dwukrotnie większej wartości prędkości posuwu (1200 mm/min) w stosunku do poprzednich prób (tabl. II). Podsumowując: największy wpływ na poprawienie chropowatości powierzchni w zakresie trzech parametrów technologicznych ma prędkość posuwu. Jeszcze bardziej znaczący wpływ ma liczba przejść narzędzia, jednak jest to związane ze zwiększeniem sumarycznego czasu obróbki.

## Badania własne

Poniżej przedstawione zostały wybrane próby badania wpływu parametrów skrawania narzędziami szczotkowymi na chropowatość powierzchni obrobionej dla trzech materiałów: Inconelu, stali oraz aluminium. Są to badania o charakterze wstępnym bez przeprowadzonego wcześniej

planowania eksperymentu. Pełne badania planuje się przeprowadzić w ramach jednej z prac doktorskich realizowanej na Politechnice Warszawskiej.

## Badania Inconelu 718

Do obróbki Inconelu dedykowane są narzędzia oznaczone kolorem białym bądź niebieskim (rys. 5). Próby przeprowadzono dla g = 0,6 mm (wielkość zagłębienia szczotki w stosunku do pozycji styku z materiałem), średnica szczotki D = 16 mm, droga skrawania s = 150 mm, powierzchnia próbki przygotowana frezowaniem czołowym, Ra=0,5 µm.

I próba (szczotka niebieska): n = 3650 obr./min, v<sub>f</sub> = 2000 mm/min, zastosowano trzy przejścia narzędzia uzyskując kolejno Ra<sub>1</sub> = 0,46 µm, Ra<sub>2</sub> = 0,44 µm, Ra<sub>3</sub> = 0,43 µm,

II próba (szczotka niebieska): n=3650 obr./min, v<sub>f</sub> = 1000 mm/min, jedno przejście, Ra = 0,39 µm,

III próba (szczotka niebieska): n = 3650 obr./min, v<sub>f</sub> = 250 mm/min, jedno przejście, Ra=0,29 µm. Wartość zużycia (skrócenia) szczotki po trzech próbach wyniosła 0,015 mm,

IV próba (szczotka biała): n = 3650 obr./min, v<sub>f</sub> = 1000 mm/min, jedno przejście, Ra = 0,43 µm,

V próba (szczotka biała): n = 3650 obr./min, v<sub>f</sub> = 250 mm/min, jedno przejście, Ra = 0,49 µm.

## Badania stali

Do obróbki stali St5 wykorzystano szczotkę białą. Próby przeprowadzono dla szczotki o średnicy D = 16 mm, droga skrawania s = 100 mm, powierzchnia próbki przygotowana frezowaniem czołowym, Ra = 4,72 µm. Zastosowano trzy przejścia narzędzia:

I przejście: n = 3650 obr./min, v<sub>f</sub>=1000 mm/min, g = 0,6 mm, uzyskana chropowatość powierzchni Ra=4,48 µm,

II przejście: n = 4250 obr./min, v<sub>f</sub>= 500 mm/min, g = 0,6 mm, uzyskana chropowatość powierzchni Ra=4,05 µm,

III przejście: n = 4250 obr./min, v<sub>f</sub>= 500 mm/min, g = 1,5 mm, uzyskana chropowatość powierzchni Ra = 3,38 µm.

**Tablica I.** Wpływ parametrów obróbki na chropowatość powierzchni obrobionej (materiał: aluminium A5052, obróbka wstępna: frezowanie czołowe, użyte narzędzie: A11-CB40M) (źródło: [4])

**Table I.** Influence of machining parameters on machined surface roughness (material: aluminium A5052, rough machining: face milling, used tool: A11-CB40M) (source: [4])

Ustawienia początkowe	Prędkość obrotowa [min <sup>-1</sup> ]	Głębokość skrawania [mm]	Prędkość posuwu [mm/min]	Ra przed [µm]	Ra po [µm]
	4000	0,5	1200	0,880	0,436
1 zmiana	5000	0,5	1200	0,875	0,424
2 zmiana	4000	0,1	1200	0,864	0,415
3 zmiana	4000	0,5	600	0,921	<b>0,354</b>

**Tablica II.** Wpływ liczby przejść narzędzia na chropowatość powierzchni obrobionej (T1 – test 1, T2 – test 2, źródło: [4])

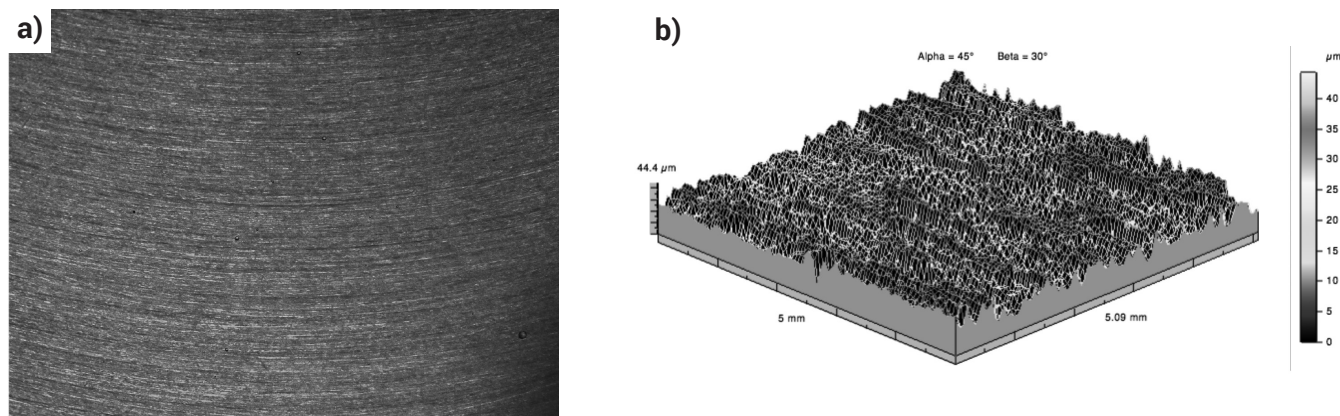
**Table II.** Influence of number of cutting tool passes on machined surface roughness (T1 – test 1, T2 – test 2, source: [4])

	Prędkość obrotowa [min <sup>-1</sup> ]	Głębokość skrawania [mm]	Prędkość posuwu [mm/min]	L. prz.	Czas cyklu [min]	Ra przed [µm]	Ra po [µm]		
							1 prz.	2 prz.	3 prz.
T1	4000	0,5	600	1	1	0,921	0,354	–	–
	4000	0,5	1200	2	1	0,901	0,459	0,325	–
T2	4000	0,5	400	1	1	0,918	0,327	–	–
	4000	0,5	1200	3	1	0,894	0,467	0,324	<b>0,226</b>

## Badania aluminium

Do obróbki aluminium dedykowane są narzędzia oznaczone kolorem białym bądź czerwonym (rys. 5). Próby przeprowadzono dla pięciu wartości posuwu przy stałych pozostałych parametrach:  $n = 3650$  obr./min,  $g = 0,6$  mm, średnica szczotki  $D = 16$  mm, droga skrawania  $s = 100$  mm, powierzchnia próbki przygotowana frezowaniem czołowym,  $R_a = 1$   $\mu\text{m}$ . Wartości uzyskanych chropowatości powierzchni  $R_a$  zestawiono

w tablicy III. Wyniki prób pokazują niewielki wpływ prędkości posuwu na  $R_a$  w przypadku szczotki białej oraz znaczący w przypadku szczotki czerwonej. Na rysunku 11 pokazano widok przykładowej powierzchni obrabianej z charakterystycznymi śladami przejść włókien narzędzia oraz strukturę geometryczną powierzchni dla następujących parametrów obróbki: szczotka biała o średnicy  $D = 16$  mm, wysunięcie włókien 10 mm, głębokość zanurzenia włókien  $a_p = 0,5$  mm, prędkość posuwu 4000 mm/min, prędkość obrotowa  $n = 4000$  obr./min.



Rys. 11. a) widok powierzchni obrabianej szczotkowym narzędziem ceramicznym (powiększenie 15-krotne); b) struktura geometryczna powierzchni (źródło: opracowanie własne)

Fig. 11. a) view of surface machined with brush type ceramic tool (magnification 15 times), b) surface geometric structure (source: own case study)

Tablica III. Wartości uzyskanych chropowatości powierzchni  $R_a$  w zależności od typu szczotki i prędkości posuwu [ $\mu\text{m}$ ] (źródło: opracowanie własne)

Table III. Values of obtained roughnesses  $R_a$  depending on brush type and value of feed rate [ $\mu\text{m}$ ] (source: own case study)

Typ szczotki/ $v_f$	4000 mm/min	2000 mm/min	1000 mm/min	500 mm/min	250 mm/min
czerwona	0,53	0,45	0,40	0,50	0,65
biała	0,75	0,82	0,96	0,95	0,95

## Wnioski

Przeprowadzone badania własne w znacznej mierze potwierdziły wyniki testów narzędzi wykonanych przez producenta. Zarówno zmniejszenie prędkości posuwu, jak i zwiększenie liczby przejść skutkowało zmniejszeniem wartości chropowatości, przy czym wpływ liczby przejść okazał się mniej znaczący. Zarówno próby producenta, jak i autorów potwierdziły, że nie należy stosować zbyt dużej liczby przejść (maksymalnie 3), gdyż w określonych warunkach skrawania istnieje pewna progowa liczba przejść, powyżej której chropowatość powierzchni nie ulega już poprawie. Ceramiczne narzędzia szczotkowe mogą mieć kapitalne znaczenie w obróbce materiałów twardych i trudnoskrawalnych, takich jak np. Inconel, szczególnie w przypadku obróbek wykończeniowych przedmiotów o skomplikowanych kształtach. Wysokie parametry technologiczne zabiegów z wykorzystaniem narzędzi ceramicznych przyczyniają się do znacznego zredukowania czasu obróbki, co czyni je konkurencyjnymi wobec tradycyjnie stosowanych narzędzi. Poprzez bezpośrednie wykorzystanie takich narzędzi na obrabiarce można całkowicie wyeliminować ręczną obróbkę wykończeniową i stanowiska z nią związane.

Szczotkową konstrukcję narzędzia można również wykorzystać do nakładania cienkich warstw metalicznych (np. tytanu) na powierzchnie ceramiczne w celu ułatwienia dalszego procesu spawania ceramiki z metalami [2]. Badania z tym związane są obecnie prowadzone w Instytucie Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej.

## Literatura

- [1] [1] Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT. Warszawa, 1995.
- [2] Chmielewski T.: Wykorzystanie energii kinetycznej tarcia i fali detonacyjnej do metalizacji ceramiki. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, T 242, Mechanika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2012.
- [3] Sałaciński T., Pająk P.: Obróbka wykończeniowa powierzchni z wykorzystaniem narzędzi ceramicznych do gratowania i polerowania. Mechanika nr 10/2015.
- [4] Materiały firmowe XEBEC.
- [5] Materiały firmowe LOESER.